Rafael Herrero Alonso

**Sistema autônomo de comunicação sem fio em malha
alimentado por energia solar fotovoltaica**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica

São Paulo

2009

Rafael Herrero Alonso

**Sistema autônomo de comunicação sem fio em malha
alimentado por energia solar fotovoltaica**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos.

Orientadora: Profa. Dra. Roseli de Deus Lopes.

São Paulo

2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 29 de junho de 2009

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Alonso, Rafael Herrero

**Sistema autônomo de comunicação sem fio em malha alimentado por energia solar fotovoltaica / R.H. Alonso. – Ed. Rev. -- São Paulo, 2009.
100 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Energia solar 2. Sistema de comunicação 3. Wireless 4. Redes sem fio em malha I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a todos aqueles que acreditaram em mim e me deram palavras de otimismo
nos momentos mais árduos da caminhada, não permitindo que eu desanimasse.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me inspirou e iluminou ao longo da caminhada e deu forças para concluir este trabalho.

Aos meus pais, por toda educação que me deram, pelo apoio em meus estudos e principalmente pelo exemplo de vida.

À minha namorada e a todos os meus parentes e amigos, pelo incentivo e pela força.

À minha orientadora, Prof^a. Dra. Roseli de Deus Lopes e ao Prof. Dr. Marcelo Knorich Zuffo, pela dedicação para com a minha formação acadêmica, profissional e moral, sendo para mim exemplos a serem seguidos.

Ao Dr. Michail Bletsas, responsável pela conectividade do projeto *One Laptop per Child* (OLPC), por disponibilizar módulos de comunicação sem fio em malha, ao Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da USP (LSI-EPUSP).

À empresa Heliodinâmica S.A., que disponibilizou módulos de armazenamento e fotovoltaicos com base no dimensionamento preliminar realizado neste trabalho, que permitiram a implementação de três protótipos.

Ao especialista em sistemas eletrônicos Ciro Melo e a toda a equipe do Núcleo de Engenharia de Mídias do LSI que deram apoio ao desenvolvimento deste projeto.

Aos funcionários dos serviços gerais, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que sempre estiveram dispostos a colaborar no suporte para instalação dos sistemas para testes em campo.

RESUMO

A tecnologia de comunicação em redes sem fio em malha, com base no padrão IEEE 802.11, tem sido uma solução tecnológica relevante no cenário atual das redes sem fio. Entretanto, com a eliminação dos cabos para comunicação de dados, as redes sem fio em malha dependem de fonte de energia para energizar os pontos de acesso da rede, que nem sempre está disponível na forma cabeada no local da instalação. Neste cenário, sendo o Brasil um país situado em uma zona tropical com alta incidência anual de radiação solar, a possibilidade da utilização da conversão da energia solar em elétrica é uma alternativa para eliminar a dependência de fonte de energia cabeada dos pontos de acesso da rede sem fio em malha. Este trabalho apresenta considerações sobre o desenvolvimento de sistemas autônomos de comunicação sem fio em malha, alimentados por energia solar fotovoltaica, compactos e de fácil instalação em área urbana e rural. Apresenta também, informações sobre o protótipo implementado denominado SAM Solar e respectiva avaliação quanto a autonomia, área de cobertura, número de usuários, altura mínima de instalação e taxa de transferência.

Palavras-chave: Energia solar, Sistema de comunicação, *Wireless*, Redes sem fio em malha.

ABSTRACT

The wireless mesh network communication technology, based on the IEEE802.11 standard, has been a relevant technology solution for wireless networking in the recent years. However, even with the elimination of cables for data communication, the wireless mesh networks have to be connected to a voltage source using an electrical cable that may not be available at the local installation. In this scenario, being Brazil a country located in a tropical zone that receives large annual solar irradiation, the conversion of photons to electricity can be an alternative to eliminate the needs of wiring to the mesh access points. This work contributes to the development of autonomous wireless mesh communication systems powered by solar energy, with easy installation in urban or rural areas. This work also describes its evaluations in aspects such as autonomy, wireless coverage, number of users supported, installation height and throughput.

Key words: Solar energy, Communication system, Wireless, Wireless mesh networks

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia da AlohaNet	19
Figura 2 – Comparativo entre tecnologias de redes sem fio (INATEL, 2009)	21
Figura 3 – Conjunto Independente de Serviços Básicos (IEEE802.11,1999)	23
Figura 4 – Conjunto de Serviços Básicos	24
Figura 5 – Arquitetura das redes com infraestrutura	25
Figura 6 – Alocação de canais do padrão IEEE802.11b (COUTINHO, 2006).....	26
Figura 7 – Alocação de canais do padrão IEEE802.11a (COUTINHO, 2006)	26
Figura 8 – Elementos das redes sem fio em malha.....	29
Figura 9 – Topologia de redes sem fio em malha WiMAX (SEDOYEKA, 2007)	31
Figura 10 – Radiação solar que atinge a superfície da Terra.....	33
Figura 11 – Faixa espectral da radiação solar (ELERT, 2008)	33
Figura 12 – Intensidade de energia versus comprimento de onda (ROHDE, 2007)	34
Figura 13 – Matriz energética brasileira (PEREIRA <i>et al.</i> , 2006)	37
Figura 14 – Matriz de energia convertida no Brasil (PEREIRA <i>et al.</i> , 2006).....	37
Figura 15 – Potencial solar no Brasil (PEREIRA <i>et al.</i> , 2006)	38
Figura 16 – Média anual de insolação diária (PEREIRA <i>et al.</i> , 2006).....	39
Figura 17 – Irradiação média entre 1991 e 1993 (BISHOP e ROSSOW, 1991).....	40
Figura 18 – Locais com maior insolação do planeta Terra (LOSTER, 2006).....	41
Figura 19 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico.....	41
Figura 20 – (a) Célula de silício; (b) Módulo fotovoltaico (SOLARFABRIK, 2004) ...	42
Figura 21 – Custo médio dos módulos fotovoltaicos (WORLDWATCH, 2007)	44
Figura 22 – Ponto de potência máxima (CRESESB, 1999)	45
Figura 23 – Bateria de ácido de chumbo (SONNENSCHNEIN, 2004).....	47
Figura 24 – Capacidade de bateria (figura adaptada da ENERSYS, 2006)	47
Figura 25 – Ciclo de vida e profundidade de descarga (ENERSYS, 2006)	48
Figura 26 – Controlador série (MANUAL FOTOVOLTAICO, 2004).....	49
Figura 27 – Controlador <i>Shunt</i> (MANUAL FOTOVOLTAICO, 2004)	50
Figura 28 – Controlador MPP (MANUAL FOTOVOLTAICO, 2004)	51
Figura 29 – Protótipo <i>SolarMesh</i> (SOLARMESH, 2002).....	55
Figura 30 – Topologia do projeto (SOLARMESH, 2002)	56
Figura 31 – Protótipo <i>WiFi Grid Project</i> (GREEN-WIFI, 2006).....	57
Figura 32 – Produto <i>Meraki Solar</i> (MERAKI, 2008).....	57

Figura 33 – Diagrama de blocos do sistema proposto.....	59
Figura 34 – Cenário 1 para avaliação elétrica do módulo de comunicação	61
Figura 35 – Cenário 2 para avaliação elétrica do módulo de comunicação	62
Figura 36 – Cenário 3 para avaliação elétrica do módulo de comunicação	62
Figura 37 – Cenário 4 para avaliação elétrica do módulo de comunicação	63
Figura 38 – Equipamentos utilizados na avaliação do módulo de comunicação	68
Figura 39 – Variação de tensão	68
Figura 40 – Variação de corrente	69
Figura 41 – Variação de potência	70
Figura 42 – Curvas características I x V a 45 °C (HELIODINÂMICA, 2008)	75
Figura 43 – Módulo de controle de energia desenvolvido	76
Figura 44 – Diagrama de blocos dos módulos do sistema	77
Figura 45 – Caixa de montagem.....	78
Figura 46 – Fixação das baterias	78
Figura 47 – Fixação do módulo de comunicação	79
Figura 48 – Miniposte de fixação	79
Figura 49 – Fixação do módulo de controle de energia	80
Figura 50 – Visualização da rede sem fio em malha solar – EPUSP	83
Figura 51 – Zona de Fresnel entre sistemas	84
Figura 52 – (a) e (b) Protótipo instalado em poste de iluminação a 6 metros de altura .	85
Figura 53 – Número de saltos da rede sem fio em malha solar (10/12/2008).....	87
Figura 54 – Taxa de transmissão (10/12/2008)	88
Figura 55 – Tela de acesso e cadastramento dos novos usuários (MERAKI, 2009).....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de padrões de comunicação sem fio (INATEL, 2009)	21
Tabela 2 – Comparativo entre os tipos de células solares (FRAUNHOFER, 2004).....	43
Tabela 3 – Comparativo entre baterias (BATTERYUNIVERSITY, 2003).....	45
Tabela 4 – Características nos controladores de carga (MORNINGSTAR, 2009)	52
Tabela 5 – Consumo de equipamentos residenciais (SOLENERG, 2009).....	53
Tabela 6 – Comparativo entre os sistemas de comunicação solares	58
Tabela 7 – Comparativo das características elétricas para os cinco cenários.....	71
Tabela 8 – Dimensionamento do módulo de armazenamento.....	72
Tabela 9 – Especificação do módulo de armazenamento do sistema.....	73
Tabela 10 – Especificação do módulo fotovoltaico do sistema.....	74
Tabela 11 – Balanço energético no período de 7 dias com o 3º dia sem insolação	81

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AP	<i>Access Point</i> Ponto de Acesso
BSS	<i>Basic Service Set</i> Conjunto de Serviços Básicos
CEPA	Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada
CRESESB	Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CSAIL	<i>Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory</i> Laboratório de Ciência da Computação e Inteligência Artificial
ESS	<i>Extended Service Set</i> Conjunto Estendido de Serviço
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> Comissão Federal de Comunicações
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i> Conjunto Independente de Serviços Básicos
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> Instituto dos Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i> Força-Tarefa da Engenharia na Internet
IMP	<i>Interface Message Processors</i> Processador de Mensagens por Interface
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> Organização Internacional de Padronização
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> União das Comunicações Internacionais
LSI-EPUSP	Laboratório de Sistemas Integráveis Tecnológicos da Escola Politécnica da USP
MAC	<i>Media Access Control</i> Controle de Acesso ao Meio

MAP	<i>Mesh Access Point</i> Ponto de Acesso em Malha
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> Instituto Tecnológico de Massachusetts
MP	<i>Mesh Point</i> Ponto em Malha
MPP	<i>Mesh Portal Point</i> Portal em Malha
OLPC	<i>One Laptop Per Child</i> Um Laptop por Criança
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i> Interconexão de Sistemas Abertos
PPM	Ponto de Máxima Potência
UCA	Um Computador por Aluno
UFF	Universidade Federal Fluminense
USP	Universidade de São Paulo
WIMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-ondas
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> Rede sem fio de Área Local
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i> Rede sem fio de Área Metropolitana
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> Rede sem fio de Área Pessoal
WWAM	<i>Wireless Wide Area Network</i> Rede sem fio de Ampla Área

SUMÁRIO

Capítulo 1

Introdução.....	13
1.1 MOTIVAÇÃO.....	14
1.2 RELEVÂNCIA	14
1.3 OBJETIVO.....	15
1.4 METODOLOGIA	15
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16

Capítulo 2

Fundamentação Teórica.....	18
2.1 REDES DE COMPUTADORES	18
2.2 REDES SEM FIO.....	20
2.2.1 REDE SEM FIO DE ÁREA PESSOAL (WPAN).....	22
2.2.2 REDE SEM FIO DE ÁREA LOCAL (WLAN)	22
2.2.2.1 ARQUITETURAS DAS REDES SEM FIO IEEE802.11	22
2.2.2.2 EXTENSÃO IEEE802.11B	25
2.2.2.3 EXTENSÃO IEEE802.11A	26
2.2.2.4 EXTENSÃO IEEE802.11G	26
2.2.2.5 EXTENSÃO IEEE802.11N	27
2.2.2.6 EXTENSÃO IEEE802.11S – REDE SEM FIO EM MALHA	28
2.2.2.7 COMPARAÇÕES ENTRE AS EXTENSÕES	30
2.2.3 REDES SEM FIO DE ÁREA METROPOLITANA (WMAN)	30
2.2.4 REDES SEM FIO DE AMPLA ÁREA (WWAN)	32
2.3 ENERGIA SOLAR.....	32
2.3.1 BREVE HISTÓRICO DO SOL COMO FONTE DE ENERGIA	34
2.3.2 ENERGIA SOLAR NO BRASIL E NO MUNDO	36
2.3.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	41
2.3.3.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO	42
2.3.3.2 MÓDULO DE ARMAZENAMENTO	45
2.3.3.3 MÓDULO DE CONTROLE DE ENERGIA.....	49
2.3.3.4 MÓDULO ALIMENTADO.....	52
2.4 SOLUÇÕES EXISTENTES	53

Capítulo 3

Proposta de Sistema de Comunicação Sem Fio em Malha Alimentado por Energia Solar Fotovoltaica	59
3.1 DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA.....	59
3.2 REQUISITOS DO MÓDULO DE COMUNICAÇÃO.....	60
3.2.1 CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE COMUNICAÇÃO	61
3.3 REQUISITOS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	63
3.4 REQUISITOS DO MÓDULO DE ARMAZENAMENTO	64
3.5 REQUISITOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DE CONTROLE DE ENERGIA	65
3.6 CONCLUSÕES	65

Capítulo 4

Testes e Avaliação dos Resultados do Módulo de Comunicação Sem Fio..... 66

4.1	ESCOLHA DO MÓDULO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM MALHA DO SISTEMA	66
4.2	AMBIENTE PARA AVALIAÇÃO ELÉTRICA DO MÓDULO DE COMUNICAÇÃO	67
4.3	VARIAÇÃO DE TENSÃO	68
4.4	VARIAÇÃO DE CORRENTE	69
4.5	VARIAÇÃO DE POTÊNCIA.....	70
4.6	SÍNTESE DA AVALIAÇÃO ELÉTRICA DO MÓDULO DE COMUNICAÇÃO	71
4.7	CONCLUSÕES	71

Capítulo 5

Dimensionamento e Implementação do Sistema..... 72

5.1	DIMENSIONAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DO MÓDULO DE ARMAZENAMENTO	72
5.2	DIMENSIONAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO	73
5.3	DIMENSIONAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DE CONTROLE DE ENERGIA.....	75
5.4	MONTAGEM E INSTALAÇÃO DO SISTEMA	78
5.5	COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DO SISTEMA.....	80
5.6	CONCLUSÕES	81

Capítulo 6

Testes, Resultados e Avaliação do Sistema 82

6.1	AUTONOMIA	82
6.2	ÁREA DE COBERTURA	83
6.3	ALTURA MÍNIMA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE SISTEMAS.....	84
6.4	NÚMERO DE USUÁRIOS.....	85
6.5	NÚMERO MÁXIMO DE SALTOS (<i>HOPS</i>).....	86
6.6	TAXAS DE TRANSFERÊNCIA	87
6.7	SEGURANÇA DE INFORMAÇÃO	88
6.8	CONCLUSÕES	89

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros 91

7.1	CONTRIBUIÇÕES	91
7.2	TRABALHOS FUTUROS.....	92

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

Capítulo 1

Introdução

Segundo dados apresentados pela ITU (*International Telecommunications Union*), no final do ano 2007, estima-se que mais de 1,5 bilhão de pessoas já estavam conectadas à Internet naquele ano (ITU, 2008).

Segundo o Ministério das Comunicações (2008), o Brasil ultrapassa 60 milhões de usuários conectados à Internet, sendo um dos países que possuem maior número de usuários conectados na rede mundial de computadores, juntamente com EUA, China, Japão, Alemanha e Índia. Este número representa aproximadamente 32% de toda a população brasileira, que segundo (IBGE, 2008) é de 186 milhões.

A recente disseminação de tecnologias de redes de comunicação sem fio tem contribuído significativamente para a ampliação do acesso à Internet.

Uma rede de comunicação sem fio é formada por pontos de acesso, estações e um sistema de distribuição. Esses dispositivos são providos de uma ou mais antenas e alimentados por uma fonte de energia elétrica cabeada e conectada a uma rede de dados, com acesso ou não à Internet. Sua função é converter e transmitir, por meio de ondas eletromagnéticas, informações para dispositivos localizados dentro de uma área específica, conhecida como área de cobertura, permitindo a comunicação entre dispositivos por meio de sinais transmitidos pelo ar.

As redes de comunicação sem fio apresentam vantagens em relação às redes cabeadas tais como: maior velocidade na instalação, menor vulnerabilidade ao vandalismo, maior confiabilidade em caso de enchentes, imunidade a roedores, maior facilidade na manutenção, maior acessibilidade aos equipamentos, entre outras.

Mesmo com a expansão das comunicações sem fio e a proliferação dos pontos de acesso, esta tecnologia está restrita a locais que possuem fonte de energia elétrica bem estabelecida e facilidade para instalação de rede de dados com acesso ou não à Internet.

Em países tropicais, como o Brasil, a utilização da energia solar como alternativa à energia elétrica convencional, cabeada, necessária para alimentação dos pontos de acesso é viável em praticamente todo o território nacional (PEREIRA *et al.*, 2006).

O foco deste trabalho é o de estabelecer considerações para o desenvolvimento de sistemas autônomos de comunicação sem fio, alimentados por energia solar fotovoltaica, compactos e de fácil instalação.

Para tal envolve o estudos na área de comunicações sem fio e sistemas fotovoltaicos, bem como a implementação de um protótipo e respectivos testes em campo.

1.1 Motivação

A principal motivação deste trabalho nasceu como fruto do engajamento do autor, como estagiário em 2004 e como pesquisador a partir de 2006, em projetos desenvolvidos pelo Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LSI-EPUSP) em redes de comunicação sem fio para inclusão digital sob a supervisão da Profa. Dra. Roseli de Deus Lopes, do Prof. Dr. Marcelo Knorich Zuffo e Mestre em Engenharia Elétrica Hilton Fernandes.

Disponibilizar cobertura de redes sem fio, sem a necessidade de custos adicionais, com a instalação e distribuição de energia elétrica cabeada e incentivo à utilização da energia solar fotovoltaica no Brasil são motivações adicionais que incentivaram o autor no desenvolvimento deste trabalho.

Durante o ano de 2007 o LSI esteve envolvido na avaliação da conectividade de protótipos desenvolvidos pelo MIT Media Lab., no escopo do projeto do governo brasileiro denominado Um Computador por Aluno (UCA), (MIRANDA, *et al.*, 2008), como uma alternativa de baixo custo para promover a inclusão digital e melhorar a educação em países pobres. Além deste projeto, o LSI vem estudando e desenvolvendo projetos ligados à fornecimento de internet sem fio em cidades no interior de São Paulo para interligação de prefeituras, hospitais, centros de saúde e escolas, com redes sem fio em malha.

1.2 Relevância

Os estudos e resultados dos projetos de redes sem fio apontam a necessidade da utilização de fontes de energia alternativa para alimentação dos equipamentos de comunicação, uma vez que os pontos de energia elétrica nem sempre estão disponíveis no local da instalação, sendo necessárias intervenções na construção civil, para disponibilização de cabeamento de energia elétrica para alimentação dos dispositivos.

Este trabalho apresenta estudos e resultados experimentais que indicam a viabilidade do uso da energia solar, principal e mais abundante energia alternativa disponível no Brasil (PEREIRA *et. al.*, 2006), para alimentação de equipamentos de redes sem fio.

Mesmo com a viabilização da produção de fotocélulas e sendo o este um país localizado em uma zona tropical, com alta incidência de radiação solar anual, a utilização de energia solar no país ainda representa menos de 2,8% de toda a matriz energética brasileira, enquanto que a conversão da energia hidráulica em elétrica é de 84%.

Com este trabalho, por meio de levantamento bibliográfico, sistematização dos conhecimentos e resultados experimentais, pretende contribuir para o desenvolvimento de módulos de comunicação sem fio em malha, com menor consumo de energia, módulos fotovoltaicos de menores dimensões e mais eficientes, bem como sistemas de armazenamento alternativos.

1.3 Objetivo

O objetivo central deste trabalho é estabelecer considerações para o desenvolvimento implementação e avaliação de um sistema autônomo de comunicação sem fio em malha, alimentado por energia solar fotovoltaica, integrado a um protótipo compacto e autônomo, de fácil instalação em área rural e urbana, denominado Sistema Autônomo em Malha Solar (SAM Solar).

Desta forma, os objetivos específicos deste trabalho foram a pesquisa de módulos de comunicação de baixo consumo e a avaliação energética com base na comunicação sem fio, identificação de soluções de sistemas autônomos de comunicação sem fio em malha, pesquisa e dimensionamento de módulo fotovoltaico e módulo de armazenamento, desenvolvimento de módulo de controle de energia e avaliação de um protótipo de sistema autônomo em operação real.

1.4 Metodologia

A realização deste trabalho envolveu as seguintes atividades:

- Levantamento bibliográfico das redes sem fio com base no padrão IEEE802.11, definidas como IEEE802.11a/b/g/n/s, estudar as arquiteturas das redes sem fio, estado da arte do padrão IEEE802.11s e projetos acadêmicos e comerciais, que

implementaram suas próprias soluções, para comunicação sem fio em malha no Brasil e no mundo;

- Definição das especificações técnicas mínimas para especificação do módulo de comunicação sem fio em malha do sistema proposto;
- Avaliação das características elétricas do módulo de comunicação sem fio em malha de uma rede sem fio, convencional;
- Análise dos resultados obtidos na avaliação do módulo de comunicação. Estes resultados serão utilizados para o dimensionamento dos módulos de armazenamento, fotovoltaicos e controladores de energia;
- Levantamento bibliográfico do panorama mundial e brasileiro, relacionado à utilização da energia solar fotovoltaica e estado da arte dos componentes dos sistemas solares autônomos;
- Proposta de um sistema formado por módulo fotovoltaico, módulo de armazenamento, com baterias, módulo de controle de energia e módulo de comunicação sem fio em malha, integrados em uma plataforma compacta e autônoma, de fácil instalação em área rural e urbana;
- Implementação de um protótipo do sistema proposto;
- Testes em campo referente a cobertura, taxa de transmissão, autonomia, número de usuários, altura sem interferência na Zona de Fresnel, segurança da informação, topologia;
- Avaliação dos resultados experimentais.

1.5 Estrutura da Dissertação

O texto encontra-se organizado em sete capítulos.

O Capítulo 1 deste trabalho apresenta a introdução ao tema, motivação e relevância, buscando situar o leitor no contexto e escopo deste trabalho.

O Capítulo 2 é dividido em três seções: redes sem fio, energia solar e soluções existentes. Na primeira seção é apresentada uma revisão bibliográfica das redes sem fio, breve histórico, estado da arte, padronização, descrição das extensões do padrão IEEE802.11a/b/g/n/s, comparações entre os padrões e as arquiteturas de redes sem fio. Na

segunda seção é apresentada uma revisão bibliográfica da energia solar, breve histórico, estado da arte, panorama brasileiro e mundial, descrição dos elementos de um sistema solar. A terceira seção apresenta as soluções existentes de sistemas de comunicação sem fio em malha, alimentados por energia solar fotovoltaica e um comparativo entre as soluções encontradas, bem como comentários sobre principais trabalhos correlatos.

O Capítulo 3 apresenta a proposta do sistema, desdobramento do objetivo, diagrama de blocos do sistema, descrição da operação, requisitos para o dimensionamento e especificação dos módulos do sistema.

O Capítulo 4 apresenta os testes e avaliação dos resultados do módulo de comunicação sem fio em malha.

O Capítulo 5 apresenta o dimensionamento e a especificação do módulo fotovoltaico, armazenamento e controle de energia, bem como a implementação de um protótipo funcional.

O Capítulo 6 apresenta os testes e resultados da avaliação do protótipo implementado e as principais discussões.

O último capítulo contém as conclusões finais do trabalho e sugestões de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão da literatura e oferecer uma visão atualizada dos assuntos tratados neste trabalho, permitindo uma familiarização com os conceitos, bem como elementos e alternativas tecnológicas envolvidas.

2.1 Redes de computadores

Em 1960, a agência americana ARPA (*Advanced Research Project Agency*), preocupada com a segurança do país em caso de ataques nucleares e a vulnerabilidade da rede de telefonia pública para transmissão das comunicações militares, identificou a necessidade da criação de uma rede de computadores com o objetivo de conectar as bases militares e os departamentos de pesquisa do governo americano. A rede foi criada em 1968 e denominada de ARPANET teve o seu berço dentro do Pentágono (TANENBAUM, 2002).

A ARPANET consistia no desenvolvimento da primeira rede operacional de computadores com base na comutação de pacotes e na conexão de inúmeros nós formados por IMPs (*Interface Message Protocol*) conectadas à rede, de modo que, se alguma linha de transmissão ou nó da rede fosse destruída, as mensagens de outros nós poderiam ser enviadas automaticamente por caminhos alternativos (TANENBAUM, 2002).

Em dezembro de 1969, uma rede experimental com quatro nós localizados em centros de pesquisa dos Estados Unidos iniciaram as operações com tecnologias diferentes. Com os resultados positivos na comunicação, nos três anos que se passaram, mais de 30 pontos de comunicação foram acrescentados à ARPANET, interligando outras universidades e centros de pesquisas nos EUA.

Paralelamente ao desenvolvimento da ARPANET, pesquisadores da Universidade do Hawaii, juntamente com o professor de engenharia Norman Abramson, na tentativa de possibilitar comunicação entre o *campus* principal da universidade com outros *campi* distribuídos no arquipélago, dentro de um raio de 300 quilômetros, tinham que resolver a dificuldade de estender cabos de telefonia sob o Oceano Pacífico.

A solução encontrada foi a utilização de rádio de ondas curtas, batizada como ALOHA *system* (ABRAMSON, 1985) e era conhecida como ALOHANET. O objetivo era investigar o

uso de comunicações de rádio como alternativa para a rede de telefonia e determinar situações em que a radiofrequência era preferível ao uso de cabo (KUO, 1974) seu funcionamento foi estruturado de maneira que houvesse o compartilhamento de comunicação entre os terminais e um computador central, mas não da maneira convencional, ponto a ponto, utilizada até o momento. Desta forma, foi decidida a utilização de canais de comunicação diretos para transmissão de informação por um simples pacote de dados de alta velocidade. Estes canais de comunicação tinham uma banda de 100 kHz, um na frequência de 413,475 MHz e outro em 407,350 MHz, respectivamente, conhecidos como canal de difusão (*Broadcast Channel*) e canal de acesso aleatório (*Random Access Channel*) e operavam em uma taxa de transmissão de 9.600 bits/s , conforme apresentado na Figura 1.

Com a definição dos parâmetros do sistema, o computador central estava preparado para receber todas as mensagens através do canal de acesso aleatório, transmitidos pelos terminais instalados nas diversas ilhas, e retransmiti-los para todos os outros terminais utilizando o canal de difusão.

Figura 1 – Topologia da AlohaNet

Após a consolidação do projeto, em junho de 1971 (ABRAMSON, 1985), o sistema desenvolvido para conectar as ilhas havaianas estava em funcionamento, sendo a primeira rede sem fio de dados da história.

Com a expansão da Internet e o surgimento dos primeiros computadores pessoais no início dos anos 80, grupos de pesquisa começaram a desenvolver alternativas proprietárias com o objetivo de interligarem os computadores à Internet sem a necessidade de cabos.

A primeira abordagem era desenvolver um dispositivo capaz de operar como ponte entre a rede fixa e a rede sem fio, para comunicação com os computadores pessoais, utilizando para esta finalidade, receptores e transmissores de radiofrequência na faixa de ondas curtas (TANEMBAUM, 2002). Estes desenvolvimentos levaram à comercialização das primeiras redes sem fio. Contudo, os padrões proprietários dificultaram o estabelecimento de comunicação entre as diferentes tecnologias.

Com o crescimento das redes sem fio, o órgão regulador do espectro de radio frequência FCC (*Federal Communication Commission*) regulamentou e organizou a utilização das faixas de frequência a serem disponibilizadas no território americano.

Nas redes sem fio, as frequências podem ser licenciadas ou não licenciadas. No Brasil, estas frequências são reguladas pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações). As faixas licenciadas são exclusivas e adquiridas em licitações do órgão regulador de serviço de telecomunicação, e as faixas não licenciadas não precisam ser adquiridas e podem ser utilizadas sem pagamento de taxas.

Por sua natureza, a radiodifusão é adequada tanto para ligações ponto a ponto quanto para ligações multiponto. Como várias estações compartilham o mesmo meio de transmissão, é necessário utilizar um método para disciplinar este compartilhamento. Alguns métodos usados são: FDM (*Frequency Division Multiplex*), TDM (*Time Division Multiplex*) e SDM (*Space Division Multiplex*).

2.2 Redes sem fio

A Figura 2 e a Tabela 1 apresentam um comparativo e especificações de comunicação sem fio, quanto à frequência de operação, alcance, serviços suportados, licença do espectro, taxa de transmissão, suporte à mobilidade, modulação, entre outros, apresentados no guia técnico do INATEL para cidades digitais.

Figura 2 – Comparativo entre tecnologias de redes sem fio (INATEL, 2009)

Parâmetro	WiMAX Fixo	WiMAX Móvel	HSPA	1xEVDO	Wi-Fi
Padrões	IEEE802.16d	IEEE802.16e	3GPP Rel. 6	3GPP2	802.11a/g/n
Taxa de downlink	9.4Mbps em 3.5Mhz (3:1 TDD) ou 6.1Mbps simétrico	46Mbps com 3:1 TDD ou 32Mbps usando 1:1	14.4Mbps usando os 15 codecs ou 7.2Mbps usando 10	4.9Mbps	54Mbps compartilhado ou mais de 100Mbps de throughput camada 2 no 802.11n
Taxa uplink	3.3Mbps em 3.5Mhz (3:1) ou 6.1Mbps simétrico	7Mbps em 10Mhz (3:1) ou 4Mbps usando 1:1	5.8Mbps	1.8Mbps	
Largura de Banda	3.5 ou 7MHz em 3.5GHz; 10 ou 20MHz em 5.8GHz	3.5, 5, 7, 8.75 e 10MHz em todas as bandas	5MHz	1.25MHz	20MHz por canal
Modulação	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM	QPSK, 8PSK, 16QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Mux	TDM	TDM/OFDMA	TDM/CDMA	TDM/CDMA	CSMA
Duplexação	TDD, FDD	TDD	FDD	FDD	TDD
Frequência	2.5, 3.5 e 5.8GHz	2.3, 2.5 e 3.5GHz	800, 900MHz, 1.8, 1.9, 2.1GHz	800, 900MHz, 1.8, 1.9GHz	2.4Ghz, 5Ghz
Alcance (raio)	até 5km	menos de 1km	até 1,5km	até 1,5km	até 100m
mobilidade	Não aplica	média	alta	alta	baixa

Tabela 1 – Especificações de padrões de comunicação sem fio (INATEL, 2009)

2.2.1 Rede sem fio de área pessoal (WPAN)

A rede sem fio pessoal (WPAN), definida pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), padrão IEEE802.15 (IEEE802.15, 2002), foi desenvolvida para operar na faixa de frequência não licenciada de 2,4 GHz, dentro da banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), com taxas de transmissão de até 1 Mbps e alcance de até 10 m. Apesar de proverem formas flexíveis de interconexão, as redes pessoais conectam números limitados de equipamentos (KRAVETS, CARTER e MAGALHÃES, 2001). Entre as redes sem fio pessoais mais conhecidas estão o infravermelho (KAHM e BARRY, 1997), o Bluetooth (JOHANSSON *et al.*, 2001) e o RFID (FINKENZELLER, 2003).

2.2.2 Rede sem fio de área local (WLAN)

As redes locais sem fio, definidas pelo IEEE, padrão IEEE802.11 (IEEE802.11, 1999), são compostas por uma subcamada MAC (*Medium Access Control*) e três camadas físicas para transmissão e recepção de dados: infravermelho, FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) (DATAR, 2008), na banda de frequências de 2,4 GHz com taxas de dados de 1 e 2 Mbps.

O perfil Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) é uma certificação registrada pela Wi-Fi Alliance (2009), que garante a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes e vem sendo empregado em edifícios de escritórios, aeroportos, comunidades residenciais, comunicação e aquisição de dados em áreas rurais e hostis e em muitas outras aplicações (COUTINHO, 2008).

2.2.2.1 Arquiteturas das redes sem fio IEEE802.11

O padrão IEEE802.11 define duas formas básicas de comunicação sem fio: o Conjunto Independente de Serviços Básicos (*Independent Basic Service Set*) e o Conjunto de Serviços Básicos (*Basic Service Set*).

2.2.2.1.1 Conjunto Independente de Serviços Básicos (IBSS)

As redes sem infraestrutura ou modo IBSS (*Independent Basic Service Set*) são formadas, no mínimo, por duas estações dentro de uma área de serviços básicos (BSA – *Basic Service Area*). As estações que operam no modo IBSS formam uma rede autossuficiente sem

participação de um ponto centralizador que coordena toda a comunicação entre os participantes, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Conjunto Independente de Serviços Básicos (IEEE802.11,1999)

As principais vantagens dessa forma de comunicação, conforme (BENSAOU, WANG e KO, 2000) são:

- roteamento efetuado pelos próprios participantes da rede, de modo distribuído, aumentando a tolerância a falhas;
- possibilidade de comunicações simultâneas – se a rede for suficientemente ampla, os nós estarão isolados e não haverá necessidade de que um nó pare de transmitir para que outro possa se comunicar.

As principais desvantagens são:

- no caso de mobilidade das estações, há a necessidade de emprego de protocolos de roteamento específicos;
- diminuição da escalabilidade à medida que aumenta o número de elementos na rede, provocando diminuição da banda disponível para cada um deles.

O modo IBSS, também chamado modo ad-hoc, é projetado para conexões ponto-a-ponto e é definido pelo padrão IEEE802.11.

O modo *ad-hoc* tem sido intensamente pesquisado, nos últimos anos e trabalhos científicos têm sido propostos com base em técnicas de balanceamento de carga, com o objetivo de minimizar a latência dos pacotes e a sobrecarga no roteamento, que afetam

diretamente a taxa de transmissão no modo *ad-hoc* (LEE e RILEY, 2005). Porém, a ineficiência do protocolo de roteamento, perda frequente de pacotes e compartilhamento de banda, ainda comprometem a utilização desta arquitetura em larga escala (KRAVETS, CARTER e MAGALHÃES, 2001).

Apesar de seu ainda limitado resultado prático, tomando como base as desvantagens relacionadas ao roteamento e processamento de comunicações simultâneas, a segunda geração das redes *ad-hoc*, conhecida como *Mobile Ad-hoc Networks* (MANET), é a base da pesquisa atual em redes sem fio em malha (BASAGNI *et al.*, 2004).

2.2.2.1.2 Conjunto de Serviços Básicos (BSS)

De acordo com o padrão IEEE802.11, as redes com infraestrutura ou modo BSS (*Basic Service Set*) são formadas por estações e ponto de acesso (AP – *Access Point*) em uma área de serviços básicos (BSA – *Basic Service Area*).

Nesta forma, o ponto de acesso representa um dispositivo concentrador central da rede. Ao usar um ponto de acesso, todos os clientes comunicam-se através deste dispositivo para estabelecer comunicações com outros clientes e acesso ao sistema de distribuição DS (*Distribution System*).

Toda comunicação entre as estações e o ponto de acesso é efetuada dentro da BSA, definida como sendo a área de cobertura do sinal de radiofrequência, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Conjunto de Serviços Básicos

A BSA, também conhecida como célula Wi-Fi, é controlada por um único AP e representa a cobertura de radiofrequência disponibilizada por ele. Para aumentar a cobertura é necessário um maior número de APs. Em função desta exigência, um sistema de distribuição cabeado é utilizado para prover comunicação entre as diversas células e integrar outras redes conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Arquitetura das redes com infraestrutura

2.2.2.2 EXTENSÃO IEEE802.11b

O padrão IEEE802.11b (IEEE802.11b, 1999), ratificado em 1999, suporta taxas adicionais de 5,5 e 11 Mbps na faixa situada em torno de 2,4 GHz, dentro da banda ISM e modulação DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).

A Figura 6 apresenta a estrutura dos canais do padrão IEEE802.11b. Pode-se observar que cada canal possui 22 MHz de banda e separação de 5 MHz entre canais. Em função desta separação, cada canal interfere em seus vizinhos e apenas os canais ortogonais 1, 6 e 11 não apresentam interferência, conforme delimitado pelas linhas grossas na figura. No Brasil, o padrão 802.11b opera entre os canais 1 e 11.

Figura 6 – Alocação de canais do padrão IEEE802.11b (COUTINHO, 2006)

2.2.2.3 EXTENSÃO IEEE802.11a

A extensão IEEE802.11a (IEEE802.11a, 1999), ratificada em setembro de 1999, utiliza a frequência de 5 GHz, dentro da banda U-NI (*Unlicensed National Information Infrastructure*) e opera com técnica de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) para atingir taxas de transmissão de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 ou 54 Mbps.

A Figura 7 apresenta a estrutura dos canais do padrão 802.11a. Podemos verificar que cada canal possui 60 MHz de banda e separação de 20 MHz entre canais. O padrão IEEE802.11a disponibiliza 8 canais ortogonais, porém, a camada física do padrão IEEE802.11 está projetada para usar um único canal de frequência num determinado instante de tempo.

Figura 7 – Alocação de canais do padrão IEEE802.11a (COUTINHO, 2006)

2.2.2.4 EXTENSÃO IEEE802.11g

A extensão IEEE802.11g (IEEE802.11g, 2003), ratificada em julho de 2003, utiliza a frequência de 2,4 GHz dentro da banda ISM. Emprega modulação OFDM para as taxas de transmissão 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 ou 54 Mbps e modulação DSSS para 1, 2, 5,5 ou 11 Mbps.

A alta taxa de transmissão foi conseguida introduzindo mudanças na camada física (PHY) do padrão IEEE802.11, ERP (*Extended Rate Physical*), na tecnologia de transmissão e nas técnicas de codificação (COUTINHO, 2006).

Para obter maior eficiência na utilização da largura de banda, o padrão IEEE802.11g usa o mecanismo de transmissão OFDM, mesma modulação definida para o padrão IEEE802.11a, porém, adaptado para a banda de frequências de 2,4 GHz.

Apesar das altas taxas de transmissão, o padrão IEEE802.11g tem as mesmas limitações do padrão IEEE802.11b, como a possibilidade de utilização de três canais ortogonais sem interferência de outros canais adjacentes.

2.2.2.5 EXTENSÃO IEEE802.11n

De acordo com o trabalho de XIAO (2005), o IEEE estabeleceu o grupo HTSG (*High Throughput Study Group*), com o objetivo de estudar taxas de transmissão acima de 100 Mbps para redes sem fio de área local do padrão IEEE 802.11.

De acordo com o grupo, o padrão IEEE 802.11n opera nas faixas de 2,4 e 5 GHz, utiliza modulação OFDM, tecnologia MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), canal de 40 MHz na camada PHY e agregação de *frames* na camada MAC.

A tecnologia MIMO opera com múltiplos transmissores, receptores e antenas, que aumentam o desempenho do sistema, oferecendo acréscimo de eficiência espectral, área de cobertura na faixa de 400 m *indoor*, compatibilidade com demais protocolos e altas taxas de transmissão, que atualmente atingem 250 Mbps podendo chegar a 600 Mbps, conforme BOLCSKEI (2006).

Além das vantagens apresentadas pela tecnologia MIMO, esta solução também agrega ao padrão IEEE802.11n, duas outras funcionalidades definidas: diversidade de antenas e a multiplexação espacial.

A diversidade de antenas aumenta a seletividade do receptor em função dos múltiplos sinais recebidos. A multiplexação por divisão espacial permite a transferência simultânea de múltiplos fluxos de dados dentro de um mesmo canal espectral.

Conforme reunião do grupo de trabalho IEEE802.11n, ocorrida em Los Angeles, Califórnia, em janeiro de 2009, o padrão encontra-se na versão *Draft 7.0* e sua finalização é esperada para novembro de 2009.

Conforme XIAO (2005), o padrão IEEE 802.11n irá atender a toda demanda de aplicações que atualmente são transportadas por fibra óptica e/ou par trançado. Considerada como a próxima geração das redes sem fio, o padrão “n” terá capacidade de transportar, através do ar, sem latência e perda de pacotes, aplicações tais como: conferência multimídia, fluxos de vídeo MPEG, aplicações de armazenamento em redes, transferência de arquivos e transmissões simultâneas de múltiplos sinais de vídeo HDTV, áudio e jogos em rede.

2.2.2.6 EXTENSÃO IEEE802.11s – Rede sem fio em Malha

Em julho de 2004 (FACIN *et al.*, 2006), o grupo foi instituído o grupo para especificação do padrão IEEE802.11s, especificamente conhecido como Conjunto em Malha de Serviços Estendidos (ESS *mesh* – *Extended Service Set mesh*).

De acordo com o *Draft* do padrão IEEE 802.11s, a rede sem fio de área local em malha é baseada em um WDS (*Wireless Distribution Service*) que faz parte de um DS (*Distribution Service*) do padrão IEEE802.11, ou seja, um conjunto de equipamentos conectados por enlaces sem fio que organizam automaticamente a topologia da rede e configuram dinamicamente os caminhos entre os dispositivos (CARRANO, BLETSAS e MAGALHÃES, 2007).

As redes sem fio em malha são topologias de rede que evoluíram das redes *ad-hoc*. As redes *ad-hoc* são formadas no mínimo, por duas estações que se comunicam sem a necessidade de um ponto centralizador, dentro de uma área de serviços básicos (BSA) (IEEE802.11, 1999).

Uma rede sem fio em malha é formada por pontos de acesso em malha – *Mesh Access Points* (MAP), estações clientes e portais em malha – *Mesh Portal* (MP) como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Elementos das redes sem fio em malha

Os MAPs são responsáveis por estabelecer uma malha de comunicação sem fio, com múltiplas rotas, entre os MAPs da rede e fornecer cobertura para estações no raio de alcance do sinal transmitido por cada MAP. O MPP (*Mesh Portal Point*) é o dispositivo responsável por interpretar as requisições enviadas pelos MAP e reenviar toda informação necessário para acesso a rede fora da rede em malha.

A rede sem fio em malha é constituída por pontos de acesso alimentados por uma fonte de energia elétrica e interconectados por uma rede sem fio, com múltiplas rotas, estabelecendo uma malha independente, gerada pelos próprios pontos de acesso.

Na arquitetura das redes sem fio em malha, os protocolos de roteamento são autoconfiguráveis e auto-organizáveis, não exigindo que todos os módulos de comunicação estejam conectados ao sistema de distribuição (DS) cabeado, facilitando a instalação e posicionamento dos pontos de acesso, que fornecem cobertura aos dispositivos dos usuários através do sinal de radiofrequência transmitido pelos pontos de acesso.

No cenário de redes sem fio em malha, mesmo com a eliminação do sistema de distribuição (DS) cabeado, conforme descrito no item 2.2.2.1 os pontos de acesso dependem de energia elétrica que nem sempre está disponível facilmente no local da instalação.

2.2.2.7 Comparações entre as extensões

Durante os cinco anos de desenvolvimento das primeiras extensões baseadas no padrão IEEE802.11, cada extensão representava um avanço e/ou melhoria do padrão anterior.

Por utilizar frequência diferente do padrão IEEE802.11b/g, o IEEE802.11a tem a vantagem de operar em uma faixa do espectro relativamente livre de interferência, ao contrário da faixa de 2,4 GHz, que além de compartilhar o espectro com equipamentos de redes sem fio, é suscetível a interferências de fornos de micro-ondas e comunicação de telefones que operam nesta mesma frequência (MIYAMOTO e MORINAGA, 1997).

Conforme avaliação (WIJESINHA *et al.*, 2000) da taxa de transmissão do padrão IEEE802.11g, em condições de fluxo contínuo de informação por UDP, o controle ideal é de 50% do valor máximo de 54 Mbps definido pelo padrão.

Diferente dos padrões IEEE802.11b/a/g, que fornecem altas taxas com diferentes especificações nas camadas físicas, o padrão IEEE802.1n concentra os esforços no aumento da potência em vez do aumento da taxa de dados, com melhorias na camada PHY e camada MAC (XIAO, 2005).

O padrão IEEE802.11s é compatível com IEEE802.11b e IEEE802.11g, porém, os esforços do grupo de tarefas S se concentram em melhorias na camada MAC, que suporta arquiteturas e protocolos autoconfiguráveis e organizáveis, bem como topologia em malha.

2.2.3 Redes sem fio de área metropolitana (WMAN)

A rede sem fio de área metropolitana (WMAN), padrão IEEE802.16 (IEEE802.16, 2004), possui as extensões IEEE802.16d e IEEE 802.16e, conhecidas respectivamente como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) fixo e móvel; definidas pelo consórcio de empresas fabricantes de equipamentos (WiMAX FÓRUM, 2008).

O padrão IEEE802.16 opera com tecnologias WLL (*Wireless Local Loop*) e LMDS (*Local Multipoint Distribution System*) para distribuição de conteúdo de voz, vídeo e dados em banda larga, de maneira similar ao usado nas redes celulares mantendo bons níveis de qualidade de serviço e técnicas de *roaming* (PAHLAVAN, KRISHNAMURTHY e HATAMI, 2000).

O padrão WiMAX tem como objetivo estabelecer a parte final da infraestrutura de conexão de banda larga, oferecendo conectividade para uso doméstico, empresarial e em

pontos de acesso. Com a capacidade de cobertura de longas distâncias na faixa de 80 quilômetros com visada direta, o WiMAX oferece mobilidade, segurança, qualidade de serviço, interoperabilidade, escalabilidade, altas taxas de transferência por canal e usuário e possibilidade de suportar topologia *mesh*,.

Denominada WiMAX WMN (*Wireless Mesh Networks*), uma rede sem fio em malha WiMAX é formada por: *Mesh Subscriber Station* (Mesh SS), *Mesh Back Haul Station* (Mesh BS) e *Back Haul*. Conforme a Figura 9, os *Mesh SS* representam as estações clientes que se comunicam a partir de uma malha de comunicação sem fio com múltiplos caminhos e com o *Mesh BS*. Os *Mesh BS* são estações que, além de fornecerem comunicação às estações clientes, estão conectadas diretamente com o *Back Haul* da rede WiMAX, por visada direta, onde a Internet é conectada.

Figura 9 – Topologia de redes sem fio em malha WiMAX (SEDOYEKA, 2007)

2.2.4 Redes sem fio de ampla área (WWAN)

As redes sem fio de ampla área (WWAN) são tecnologias definidas por órgãos de telecomunicações como o *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) e não fazem parte da família de padrões definidos pelo IEEE, do qual derivam as tecnologias Wi-Fi, WiMAX, Zigbee, Bluetooth, entre outras.

Conhecida como rede celular, esta tecnologia é classificada pela indústria em gerações, apresenta taxas de transmissão na ordem 144 Kbps até 7 Mbps nas tecnologias mais avançadas, fornece cobertura na escala de cidades e é definida por células com quilômetros de raio.

Conforme (OHMORI, YAMAO, NAKAJIMA, 2000), as gerações das redes celulares são:

- primeira geração (1G), analógica: Sistemas NMT e AMPS;
- segunda geração (2G), digital: Sistemas TDMA, CDMA e GSM;
- segunda geração e meia (2,5G): Melhorias significativas em capacidade de transmissão de dados (GPRS, 1xRTT, EVDO, EDGE) e na adoção da tecnologia de pacotes e não mais comutação de circuitos;
- terceira geração (3G): UMTS e GSM com capacidade de transmissão de dados a partir de tecnologias HSDPA, HSPA e HSUPA;
- quarta geração (4G): Em desenvolvimento com base no GSM.

2.3 Energia solar

Conforme CRABTREE e LEWIS (2007), a energia proveniente do Sol em forma de luminosidade, também conhecida como radiação solar, é responsável pela geração de inúmeras outras fontes de energia na Terra, como as correntes marítimas e atmosféricas, os ciclos de evaporação e condensação, o processo de fotossíntese, o movimento de rios e ventos, geração do petróleo e do carvão. Além disso, a energia solar pode ser aproveitada em forma de energia renovável, pela conversão da radiação em energia elétrica, térmica e/ou mecânica.

A radiação solar se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s e atinge a Terra na faixa espectral de 200 nm a 5000 nm (FERREIRA, 2006), conforme apresentado na Figura 10, que corresponde ao comprimento de onda ultravioleta até o infravermelho.

Figura 10 – Radiação solar que atinge a superfície da Terra

O restante da radiação eletromagnética é absorvido e/ou refletido pela atmosfera terrestre, conforme Figura 11.

Figura 11 – Faixa espectral da radiação solar (ELERT, 2008)

A energia solar irradiada é normalmente medida em relação à potência instantânea que incide em um determinado ponto e o total de energia que atinge esse ponto em um dia. Para a sua mensuração são utilizadas as unidades de potência por metro quadrado de área (W/m^2) por dia ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$).

Segundo MOSS (2008), em apresentação ao BNDES, “O Sol envia para a Terra energia equivalente a cerca de 10.000 vezes o consumo mundial de energia bruta”, que corresponde a $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia.

Na Figura 12, extraída do trabalho de ROHDE (2007), é apresentada a intensidade da radiação solar na atmosfera e na superfície da Terra ao nível do mar. Podemos verificar que a maior intensidade de energia solar ao nível do mar ao meio-dia com céu claro, está concentrada na faixa da luz visível, especificamente na luz verde com comprimento de onda de 500 nm.

Figura 12 – Intensidade de energia versus comprimento de onda (ROHDE, 2007)

2.3.1 Breve histórico do Sol como fonte de energia

Existem relatos de que em 212 a.C, a provável primeira aplicação que utilizava energia solar foi a estrutura de espelhos idealizada pelo matemático grego Arquimedes (MILLS e CLIFT, 1992), que constava de um enorme conjunto de espelhos que direcionavam a luz do Sol para um mesmo ponto. O objetivo da invenção era incendiar embarcações romanas a fim de defender Siracusa, porém não há comprovações históricas de que esse fato realmente ocorreu.

Segundo BEZERRA (2001), em 1615 Salomon de Caux, engenheiro francês, construiu uma caldeira solar, sendo o primeiro registro escrito da conversão da energia solar em energia mecânica.

Em 1774, Antoine-Laurent de Lavoisier construiu o primeiro forno com temperaturas próximas de 1750 °C, maior temperatura atingida naquela época pelo homem.

Em 1839, Edmond Becquerel relata o efeito fotovoltaico como sendo o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz.

Entre 1860 e 1878 B. Mouchot, professor no Liceu de Tours, construiu diversas caldeiras solares. Em 1884, John Ericson, engenheiro de origem sueca, contribuiu também na construção de engenhos solares. Em 1876, foi desenvolvido o primeiro sistema fotovoltaico resultado de estudos das estruturas no estado sólido. Oitenta anos depois, iniciou-se a produção industrial seguindo o desenvolvimento da microeletrônica.

No início do século XX, surgiram os primeiros sistemas solares de grande escala para bombeamento de água e as empresas, como a *Sun Power Company*, fundada em 1911, responsável pelo primeiro sistema solar de irrigação às margens do rio Nilo em Meadi, nas cercanias do Cairo.

Países como EUA, França, Espanha, Alemanha e Japão têm desenvolvido projetos de sistemas solares, também conhecidos como centrais solares, para geração de energia elétrica a partir da energia limpa e gratuita proveniente do Sol.

As principais vantagens da energia solar são:

- a energia solar não polui durante seu uso;
- a poluição decorrente da fabricação dos equipamentos necessários para a construção dos painéis solares é totalmente controlável, utilizando as formas de controles existentes atualmente;
- as centrais solares necessitam de manutenção mínima;
- os painéis solares são, a cada dia, mais potentes ao mesmo tempo em que seus custos vêm decaindo, o que torna a energia solar uma solução economicamente viável;
- a energia solar é uma boa alternativa de energia para lugares remotos ou de difícil acesso, pois sua instalação em pequena escala não obriga enormes investimentos em linhas de transmissão;
- em países tropicais, como o Brasil, a utilização da energia solar é viável em praticamente todo o território; e em locais longe dos centros de produção energética sua utilização ajuda a diminuir a demanda energética e consequentemente a perda de energia que ocorreria na transmissão.

As principais desvantagens da energia solar são:

- a variação na quantidade de energia convertida de acordo com a situação climática (chuvas, neve), além de que, durante a noite não existe produção alguma, o que obriga a existência de meios de armazenamento da energia produzida durante o dia;
- locais em latitudes médias e altas, como a Finlândia, Islândia, Nova Zelândia e Sul da Argentina e Chile, sofrem quedas bruscas de produção durante os meses de inverno devido à menor disponibilidade diária de energia solar;
- locais com frequente cobertura de nuvens (Curitiba, Londres) tendem a ter variações diárias de produção de acordo com o grau de nebulosidade.
- As formas de armazenamento da energia solar são pouco eficientes quando comparadas, por exemplo, aos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), à energia hidroelétrica (água) e à biomassa (bagaço da cana ou bagaço da laranja).

2.3.2 Energia solar no Brasil e no mundo

Na década de 70, o Brasil, como outros países, se deparava com uma possível crise energética provinda da redução de combustíveis fósseis e pelas previsões do aumento da demanda e consumo de energia elétrica causada pelo progresso tecnológico e avanços no desenvolvimento humano (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003).

Uma das possibilidades tecnológicas que poderiam suprir o fornecimento de energia neste cenário de crise indicava a conversão da energia proveniente do Sol a partir da fabricação de fotocélulas. Esta tecnologia se apresentava em um estágio avançado, resultado das implementações em programas espaciais (CRESESB, 1999). Mesmo em estágio avançado para a época, o custo de US\$ 600/Wp (Watts pico) para produção das células solares, as tornava economicamente inviáveis para produção em larga escala, e os países iniciaram a busca por outras fontes energéticas (CRESESB, 1999).

Com o avanço da tecnologia durante os anos subsequentes, métodos de fabricação, pesquisa e desenvolvimento de novos materiais, o custo da produção em larga escala das células solares apresenta atualmente valores na ordem de US\$ 4/Wp (WORLDWATCH, 2007).

A Figura 13 e a Figura 14 ilustram a matriz de oferta de energia primária no Brasil, conforme levantamento do Ministério de Minas e Energia (PEREIRA *et al.*, 2006).

A utilização de combustíveis fósseis para o setor de transporte responde por cerca 40% do total de energia demandada no cenário brasileiro, causando a contribuição à emissão de gases do efeito estufa (CO₂) no Brasil.

A utilização de energias renováveis, aquelas obtidas de fontes naturais capazes de se regenerar, portanto inesgotáveis, ao contrário dos recursos não-renováveis, responde por 44 % da matriz brasileira Figura 13.

Figura 13 – Matriz energética brasileira (PEREIRA *et al.*, 2006)

Mesmo com a viabilização da produção das fotocélulas, conforme descrito anteriormente, e sendo o Brasil, um país localizado em uma zona tropical, com alta incidência de radiação solar anual (PEREIRA *et al.*, 2006), a energia solar dentre outras renováveis tais como: geotérmica, maremotriz, hidrogênio, responde por menos 2,8% da demanda no país, conforme Figura 14.

Figura 14 – Matriz de energia convertida no Brasil (PEREIRA *et al.*, 2006)

A Figura 15 apresenta a radiação solar global diária – média anual típica ($\text{Wh/m}^2\cdot\text{dia}$) no território brasileiro. Este valor representa a média de energia solar incidente por hora em um metro quadrado de área, levando em consideração um dia – 24 horas. A média anual de energia incidente na maior parte do Brasil varia entre 4.000 e 5.000 ($\text{Wh/m}^2\cdot\text{dia}$) (PEREIRA *et al.*, 2006). As regiões Nordeste e Centro-Oeste representam a maior incidência de radiação solar.

Figura 15 – Potencial solar no Brasil (PEREIRA *et al.*, 2006)

A Figura 16 apresenta a média anual de insolação diária no território brasileiro. Podemos verificar que o país possui uma diversidade de condições climáticas em função de sua localização no hemisfério.

Grande parte do país apresenta uma insolação diária em torno de 6 a 7 horas, identificada pelas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Os maiores índices são observados na região Nordeste, com 8 horas de insolação diária, representados pelos locais com maior potencial de exploração da energia solar no país.

É importante ressaltar que mesmo as regiões com menores índices de radiação solar apresentam potencial de aproveitamento desta fonte energética.

Figura 16 – Média anual de insolação diária (PEREIRA *et al.*, 2006)

Em 2007, a capacidade instalada mundial de energia solar era de 2,8 GW, cerca de 18% da capacidade instalada de Itaipu.

Os principais países produtores estão situados em latitudes médias e altas. Em 2004, o maior produtor mundial era o Japão com 1,13 GW instalados, seguido da Alemanha com 794 MW e Estados Unidos com 365 MW (IEA, 2004).

Em março de 2007, a Central Solar Fotovoltaica de Serpa, situada em Portugal e instalada na área com maior exposição solar da Europa, entrou em operação com capacidade de 11 MW, sendo suficiente para abastecer cerca de oito mil habitações. (CSFS, 2007). Outra central já está em fase de construção, com cerca de seis vezes a capacidade de produção de Serpa, localizada em Moura, também em Portugal.

Mais ambicioso é o projeto australiano de uma central de 154 MW, capaz de satisfazer o consumo de 45.000 casas. Localizada em Victoria, prevê-se que entre em funcionamento em 2013, com o primeiro estágio pronto em 2010. A redução de emissão de gases conseguida por esta fonte de energia limpa será de 400.000 toneladas por ano (SOLARSYSTEMS, 2008).

A Figura 17 apresenta a insolação entre os anos de 1991 e 1993 com base em dados climatológicos do ISCCP (*International Satellite Cloud Climatology Project*). Segundo BISHOP e ROSSOW (1991), podemos verificar que os níveis de insolação são apresentados em uma faixa de cores, definida com o menor valor, a cor lilás e o maior valor, a cor vermelha.

Figura 17 – Irradiação média entre 1991 e 1993 (BISHOP e ROSSOW, 1991)

O Brasil como a África e a Austrália, está localizado entre as latitudes 30° Norte e 30° Sul, ilustrada nas cores amarela e laranja e índices de insolação entre 225 e 250 (W/m^2). Segundo BISHOP e ROSSOW (1991), esta faixa representa os locais com maiores índices de insolação e grande potência de exploração da energia solar.

Podemos observar no mapa, que países como Alemanha, Espanha, Japão e Portugal, mesmo estando fora da faixa de maior insolação e recebendo em torno de 150 a 200 (W/m^2), são identificados como as maiores potências na exploração da energia solar.

Na Figura 18 são apresentados os locais que, juntos, poderiam suprir com energia solar toda a demanda de energia do planeta Terra (LOSTER, 2006).

Figura 18 – Locais com maior insolação do planeta Terra (LOSTER, 2006)

2.3.3 Sistema Fotovoltaico

Segundo (CRESESB, 1999), um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados à rede.

A Figura 19 ilustra a configuração básica de um sistema isolado, que é formado por um módulo de controle de energia, módulo de armazenamento, módulo fotovoltaico e um determinado módulo que será alimentado.

Figura 19 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é responsável pela conversão da luz solar em energia elétrica contínua, bem como pela geração de toda energia elétrica do sistema, para alimentação do módulo alimentado e carga do módulo de armazenamento.

O módulo de armazenamento é composto por um ou por um banco de baterias. Este módulo é responsável por armazenar a energia elétrica contínua, proveniente do módulo fotovoltaico, e por manter o módulo alimentado operando durante períodos sem insolação.

O módulo de controle de energia, também conhecido como controlador de carga, gerencia e controla toda a distribuição de energia elétrica do sistema, proveniente do módulo fotovoltaico e armazenamento, bem como a energia fornecida ao módulo que será alimentado. Além disso, tem a função de proteger a vida útil das baterias contra sobrecarga ou descarga profunda.

O módulo alimentado ou carga é o dispositivo que utiliza a energia elétrica gerada pelo sistema para operar. O dimensionamento dos outros módulos do sistema depende da demanda de energia elétrica especificada para operação desta carga.

Uma descrição mais detalhada dos materiais, especificações e características técnicas de cada módulo do sistema fotovoltaico será apresentada nas próximas seções deste trabalho.

2.3.3.1 Módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são utilizados para converter a energia da luz do Sol em energia elétrica (GREEN, 1996) e são compostos por um conjunto de células que, segundo BRUTTON (2002), podem ser fabricadas utilizando-se diferentes materiais como o Si (Silício poli-cristalino, mono-cristalino ou amorfo), GIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio conhecido como filme fino), GaAS (Arsenieto de Gálio) e CdTe (Telureto de Cádmio).

Figura 20 – (a) Célula de silício; (b) Módulo fotovoltaico (SOLARFABRIK, 2004)

A Tabela 2 apresenta um comparativo de eficiência entre os diferentes tipos de células solares segundo o Instituto Fraunhofer de Energia Solar – ISE (*Institute for Solar Energy Systems*).

Material da célula solar	Eficiência da Célula η_z (Laboratório)	Eficiência da Célula η_z (Produção)	Eficiência da Célula η_w (Produção em Série)
Silício Monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício policristalino	19,8%	15%	13%
Células de silício policristalino EFG	19,7%	14%	13%
Silício cristalino de película fina	19,2%	9,5%	7,9%
Silício amorfo	13%	10,5%	7,5%
Silício micromorfo	12%	10,7%	9,1%
Célula solar híbrida HCl	20,1%	17,3%	15,2%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Telurieto de Cádmio	16,4%	10%	9%
Semicondutor III-V	35,8%	27,4%	27%
Célula sensibilizadas com corante	12,0%	7%	5%

Tabela 2 – Comparativo entre os tipos de células solares (FRAUNHOFER, 2004)

O silício, usado na fabricação dos módulos, tem sido o material predominante na produção de células solares durante 20 anos, com tendência de crescimento voltada à fabricação de células mono-cristalinas e poli-cristalinas de alta eficiência, durabilidade e baixo custo. (BRUTTON, 2002).

A eficiência de uma célula é definida como sendo a relação entre a potência produzida e a potência da radiação solar nela incidente. Atualmente as células fabricadas em laboratório possuem eficiências de 24,7% porém em linhas industriais convencionais são produzidas células com eficiência na ordem de 14% (ZANESCO e MOEHLECKE, 2005).

Como as células são caracterizadas por baixa tensão e corrente, os módulos fotovoltaicos convencionais são fabricados a partir de células agrupadas em um arranjo série-paralela, com o objetivo de alcançar maiores potências, tensões e/ou correntes (ZANESCO e MOEHLECKE, 2005).

Os módulos fotovoltaicos são medidos em condições padronizadas internacionalmente utilizadas por todos os fabricantes (IEC 60904 / DIN EM 60904, 2009).

A potência produzida é expressa em (Watts pico). Esta unidade representa a potência máxima fornecida pelo módulo fotovoltaico nas condições ideais e definidas internacionalmente. Deve-se, contudo, ter sempre em mente que a produção de energia dos

módulos fotovoltaicos não é constante neste valor, mas varia de forma diretamente proporcional à luminosidade incidente.

Uma característica importante dos módulos fotovoltaicos é sua operação em dias cobertos por nuvens. A geração será sempre proporcional à luminosidade incidente, podendo variar aproximadamente entre 60% e 10% da geração verificada em um dia de céu limpo. Em um dia pouco encoberto poderá atingir 60%, enquanto que em dias encobertos poderá ser de 10% (CRESESB, 1999).

O custo dos módulos fotovoltaicos no mercado internacional normalmente é estimado em US\$/Wp. Um módulo que fornece 75 Wp e custa de US\$ 900, tem um custo de 12 US\$/Wp.

A Figura 21 apresenta o declínio contínuo do custo dos módulos fotovoltaicos nas últimas décadas.

Figura 21 – Custo médio dos módulos fotovoltaicos (WORLDWATCH, 2007)

Podemos verificar que o custo na década de 70 era de US\$ 100/Wp. Os avanços da tecnologia durante os anos subsequentes, métodos de fabricação, pesquisa e desenvolvido de novos materiais permitiram atingir custos de produção em larga escala de 4 US\$/Wp, com tendência de continuar em declínio para os próximos anos (WORLDWATCH, 2007).

A Figura 22 (CRESESB, 1999) apresenta as curvas características de tensão, corrente e máxima potência de operação de um módulo fotovoltaico, definidas para radiação de 1.000 W/m², recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio-dia e temperatura de 25 °C.

Figura 22 – Ponto de potência máxima (CRESESB, 1999)

2.3.3.2 Módulo de armazenamento

Os módulos de armazenamento ou acumuladores de energia são compostos por uma ou mais baterias, que transformam a energia potencial química em energia elétrica, bem como são responsáveis por armazenar a energia gerada pelo módulo fotovoltaico deixando-a sempre disponível, estabilizar a tensão do sistema e servir como uma reserva de energia quando necessário (CABRERIZO, 2002).

Existem diferentes tipos de baterias, como as de ácido de chumbo, Níquel Cádmio (NiCd), Níquel Metal Hidreto (NiMH) e Fosfato de Íons de Lítio (LiFePO₄), conforme comparativo apresentado na Tabela 3.

Tabela comparativa	NiCd 6 células	NiMH 6 células	Chumbo-Ácido 6 células	LiFePO ₄ 18650 células	Chumbo-Ácido Alta capacidade
Capacidade	600mAh	1000mAh	2000mAh	2000mAh	33Ah
Tensão	7.2V	7.2V	12V	7.2V	12V
Energia por descarga	4.3Wh	7.2Wh	24Wh	14.4Wh	396Wh
Ciclo de vida (melhor caso)	1500	500	250	500	250
Custo da bateria (ref.)	\$50	\$70	\$50	\$150	\$100
Custo por kWh (\$US)	\$7.75	\$19.50	\$8.50	\$20	\$1.00

Tabela 3 – Comparativo entre baterias (BATTERYUNIVERSITY, 2003)

Com base na primeira bateria alcalina concebida por Thomas Edison, a bateria de NiCd foi desenvolvida por Waldemar Jungner na Suécia em 1899 (BARAK, 1980). Caracterizada por possuir longo ciclo de vida e manter a carga por longos períodos, as baterias recarregáveis de NiCd, foram as primeiras baterias utilizadas em equipamentos eletrônicos de baixo consumo.

As baterias de NIMH foram desenvolvidas por volta de 1980. Sua principal diferença em relação às baterias de NiCd consiste no uso de hidrogênio absorvido em uma liga, na forma de hidreto metálico, como material ativo no eletrodo negativo, em vez de cádmio utilizado nas baterias de níquel cádmio.

O eletrodo de hidreto metálico apresenta uma maior densidade de energia que um eletrodo de cádmio. Portanto, a massa de material ativo para o eletrodo negativo usado numa bateria de níquel hidreto metálico pode ser menor que a usada numa bateria de níquel cádmio. Isto permite que se possa utilizar uma maior quantidade de material ativo para o eletrodo positivo, o que resulta em uma maior capacidade ou tempo de descarga para esta bateria (LINDEN, D. REDDY, 2002).

A maioria das características operacionais das baterias seladas de níquel hidreto metálico é similar à das baterias de níquel-cádmio, porém, tendo uma alta tensão de saída, as baterias se descarregam rapidamente e possuem um menor tempo de vida comparado com as baterias de NiCd.

As baterias de fosfato de íons de lítio são caracterizadas por não possuírem efeito memória, terem a melhor relação massa-energia e baixas descargas quando não utilizadas. Mesmo sendo uma tecnologia em amadurecimento, tem sido utilizada em inúmeros dispositivos eletrônicos na atualidade (LINDEN e D. REDDY, 2002). Outras tecnologias de armazenamento são as de ar comprimido, utilizadas em projetos de fazendas solares (ZWEIBEL, MASON e FTHENAKIS, 2008) e as de nano tubos de Carbono e de Silício (XIAO e ZHOU, 2003), que estão sendo desenvolvidas.

As baterias de ácido de chumbo, conforme Figura 23, são caracterizadas por possuírem a melhor relação preço-eficiência, bem como tensão e correntes de carga estáveis. As outras baterias são utilizadas com menor frequência em função de seu custo elevado conforme apresentado pela *Battery University* (2003) na Tabela 3.

Figura 23 – Bateria de ácido de chumbo (SONNENSCHN, 2004)

Conforme CABRERIZO (2002), a capacidade de uma bateria é medida em Ampère-hora (Ah) e representa a quantidade de eletricidade que pode ser obtida durante a descarga completa em um determinado tempo, a plena carga. Conceitualmente, se a capacidade de uma bateria for de 12 Ah, ela permite 10 horas de utilização a uma corrente de 1,2 A. Quanto maior é a capacidade da bateria, maior é a autonomia do sistema alimentado na ausência de radiação solar.

A Figura 24 ilustra o comportamento de uma bateria de ácido de chumbo com capacidade de 70 Ah da ENERSYS (2006). Podemos observar as curvas de capacidade da bateria Ah em função da corrente I e tempo de operação h . Com uma corrente de 7 Ah a bateria fornece capacidade para 10 horas de operação, conforme apresentado no gráfico. Efetuando a mesma análise para 70 A é esperado 1 hora de capacidade de operação da bateria, porém, na realidade é de 0,8 hora (48 minutos) que representa uma capacidade de 56 Ah. Desta forma, podemos concluir que o comportamento de uma bateria não é linear, e para atingir a capacidade máxima definida pelo fabricante, depende de fatores como temperatura de operação, profundidade de corrente, vida útil e método de carga, que podem modificar a operação e autonomia de um sistema fotovoltaico.

Figura 24 – Capacidade de bateria (figura adaptada da ENERSYS, 2006)

Um dos fatores de maior influência na vida útil de uma bateria é a profundidade de descarga (ENERSYS, 2006). A profundidade de descarga é expressa em porcentagem (%) e representa quanto da capacidade total da bateria foi utilizada. Para uma bateria com capacidade de 100 Ah, sua profundidade de descarga será de 80% para uma utilização de 80 Ah.

As baterias de ácido de chumbo podem ser separadas em dois principais grupos segundo CABRERIZO (2002), as baterias de descarga superficial e as baterias de descarga profunda. Uma bateria de descarga superficial se comporta de maneira a descarregar entre 10% e 15% de sua capacidade total, com possibilidade de descargas entre 40% e 50%. Enquanto que as baterias de descarga profunda permitem descargas de até 80%, porém com descargas médias de 20% a 25% em uso diário.

Segundo o MANUAL FOTOVOLTAICO (2004), a vida útil de uma bateria é definida para o ponto a partir do qual, completamente carregada, a bateria tem apenas 80% da sua capacidade nominal. Depois deste ponto, a bateria pode continuar a ser utilizada, mas a sua capacidade e vida útil reduzem-se continuamente.

A Figura 25 ilustra a relação entre o ciclo de vida de uma bateria e a profundidade de descarga, apresentada por uma bateria da empresa ENERSYS. Segundo o fabricante, as baterias são desenvolvidas para operar aproximadamente cinco anos, sendo necessária a substituição após esse período. Podemos verificar que a profundidade e velocidade de descarga influenciam diretamente na vida útil da bateria, sendo necessário um módulo de controle de energia que garanta a operação da bateria dentro dos limites de utilização definidos pelo fabricante.

Figura 25 – Ciclo de vida e profundidade de descarga (ENERSYS, 2006)

2.3.3.3 Módulo de controle de energia

O módulo de controle de energia, ou controlador de carga, é um dispositivo eletrônico essencial em sistemas fotovoltaicos, pois é responsável pelo controle, gerenciamento, confiabilidade e proteção de todos os outros módulos do sistema fotovoltaico, necessário uma vez que o sistema opera com uma fonte de energia variável e sazonal (DÍAZ e LORENZO, 2001).

O módulo de controle de energia tem como funções específicas controlar a carga e descarga do módulo de armazenamento, de maneira que não o sobrecarregue ou supraaqueça-o, avaliar se a tensão do módulo de armazenamento está devidamente carregada e quando descarregada, não permitir que ultrapasse a tensão de descarga profunda, permitindo o aumento do ciclo de vida útil do módulo de armazenamento, bem como, proteger os outros módulos contra curto-circuito, inversão de polaridade e falhas que possam comprometer a operação do sistema fotovoltaico (SUNLAB, 2009).

Segundo HARRINGTON e DUNLOP (1992) os módulos de controle de energia podem ser classificados de duas maneiras: controladores série, controladores *Shunt* (ligação em paralelo). Além dos controladores de carga *Shunt* e série, será apresentado o controlador de carga PPM (Ponto de Potência Máxima), por ser uma tecnologia de controle dos sistemas fotovoltaicos da atualidade, conforme MANUAL FOTOVOLTAICO (2004).

Nos controladores em série, conforme Figura 26, quando se atinge a tensão máxima de carga, o controlador série interrompe a entrega de potência do módulo fotovoltaico através de um relé ou de um semicondutor (S_1), voltando a fechar o circuito após uma determinada redução da tensão. Estas constantes comutações liga-desliga criam oscilações da tensão perto da tensão máxima de carga, bem como perdas permanentes de energia (MANUAL FOTOVOLTAICO, 2004).

Figura 26 – Controlador série (MANUAL FOTOVOLTAICO, 2004)

Os controladores *Shunt* (ligação em paralelo), ilustrado na Figura 27, reduzem continuamente a potência do módulo fotovoltaico a partir do momento em que é atingida a tensão máxima de carga do módulo de armazenamento. Como o gerador continua a gerar energia, a corrente é curto-circuitada por um elemento do controlador de energia, denominado *Shunt*. Desta maneira, o módulo fotovoltaico passa a operar em corrente de curto-circuito e a energia não aproveitada é dissipada em forma de calor. Este método é ideal para o módulo de armazenamento, uma vez que a carga é efetuada de forma eficiente, segura e sem oscilações de tensão (MANUAL FOTOVOLTAICO, 2004).

Figura 27 – Controlador *Shunt* (MANUAL FOTOVOLTAICO, 2004)

Quando os controladores série ou *Shunt* são utilizados, o módulo fotovoltaico não atinge o PPM (Ponto de Máxima Potência), em função da tensão do módulo de armazenamento determinar o ponto de operação do módulo fotovoltaico, resultando assim, conforme MANUAL FOTOVOLTAICO (2004), numa perda de 10% a 40% de energia.

Esta perda de energia pode ser evitada, utilizando um controlador de carga PPM que é responsável por avaliar a curva de operação do módulo fotovoltaico e determinar o ponto de máxima potência. Este ajuste é efetuado por um controlador DC/DC, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Controlador MPP (MANUAL FOTOVOLTAICO, 2004)

A eficiência do controlador DC/DC varia entre 90% a 96%. Por razões de eficiência, a utilização de um controlador PPM apenas faz sentido para módulos fotovoltaicos com potências superiores a 200 W. Para módulos fotovoltaicos de baixa potência, as perdas de conversão são geralmente maiores do que os ganhos obtidos com o controlador PPM. Devido à maior complexidade do circuito eletrônico, o preço do controlador de carga PPM é superior. Isto significa que, por razões econômicas, os controladores de carga PPM são usados com maior frequência em sistemas fotovoltaicos superiores a 500 W (MANUAL FOTOVOLTAICO 2004).

Existem outros controladores de carga derivados das configurações série e *Shunt*, desenvolvidos com diferentes estágios de operação, controles liga-desliga, detalhados no trabalho da SNL (*Sandia National Laboratory, 1997*) e controles por PWM (*Pulse Width Modulation*), definidos com chaves no estado sólido que aplicam pulsos de corrente em alta frequência, porém com a variação do ciclo de operação ou largura de pulso (ERIC e ROSS, 1998).

Conforme CABRERIZO (2002), os sistemas fotovoltaicos operam em tensões de 12 V, 24 V ou 48 V. A tensão nominal de um módulo fotovoltaico deve ser superior à tensão nominal das baterias. Isto se deve pela tensão de carga de uma bateria, por exemplo, de 12 V que, para alcançar pleno estado de carga é necessário uma tensão mínima de 14 V seja fornecida pelo módulo fotovoltaico.

De acordo com os dados fornecidos pela Tabela 4, é possível observar as especificações técnicas da tensão de operação, da corrente, do consumo, entre outros, nos diferentes controladores de carga da empresa Morningstar.

Modelo		SunGuard	SunSaver 6L	SunSaver 10L	SunSaver 10L/24	SunSaver 20L	SunSaver 20L/24	ProStar 15	ProStar 15M	ProStar 30	ProStar 30M	ProStar 15M-48V
Fabricante		Morningstar										
Método de regulação		PWM série										
Tensão de operação	V	12	12	12	24	12	24	12/24*	12/24*	12/24*	12/24*	48
Seleção tipo de bateria		Não						Sim				
Display LCD		Não						Não	Sim	Não	Sim	Sim
Corrente solar	A	4,5	6,5	10	10	20	20	15	15	30	30	15
Corrente de carga	A	4,5	6	10	10	20	20	15	15	30	30	15
Consumo próprio	mA	6	6 a 10	6 a 10	6 a 10	6 a 10	6 a 10	22/25	22/25	22/25	22/25	28
Tensão de carga	V	14,1	14,4	14,4	28,8	14,4	28,8	Depende do tipo de bateria				
Tensão desconexão	V	N.A.	11,5	11,5	23,0	11,5	23,0	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
Tensão de equalização	V	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Depende do tipo de bateria				
Dimensões	mm	152x56x33						153x105x55				
Peso	kg	0,09	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Código		12313	10403	10404	12307	12308	12309	17601	17602	10350	14574	17603

Tabela 4 – Características nos controladores de carga (MORNINGSTAR, 2009)

Conforme trabalho apresentado por MONTEIRO e ZILLES (2004), as baterias de chumbo-ácido (automotiva, solar adaptada, VRLA ou estacionária) com tensão de 12 volts entre seus terminais e capacidade de acumulação em torno de 100 Ah e os controladores de carga possuem um custo médio inicial, de acordo com o mercado nacional (2004) de R\$ 320,00 e R\$ 160,00 por unidade, respectivamente.

Apesar de ter um baixo investimento inicial e anual de 9% e 8% em relação aos outros componentes MONTEIRO e ZILLES (2004), os controladores de carga, por sua vez, possuem uma importante participação nos custos finais ao longo da vida útil de um sistema fotovoltaico, que em geral, tomando como base o tempo de vida dos módulos, é de aproximadamente de 20 anos.

Tal fato deve-se à estreita relação de operação que este dispositivo possui com os acumuladores de energia. Problemas no funcionamento ou gerenciamento de energia deste elemento de controle poderão acarretar um aumento nas sucessivas trocas das baterias recarregáveis de quatro em quatro anos, elevando assim, os custos finais do sistema, além de gerar a insatisfação dos usuários e consequentemente o descrédito dos mesmos perante a tecnologia (SERPA, 2001).

2.3.3.4 Módulo alimentado

O módulo alimentado ou carga podem ser dispositivos diversos situados em residências, sítios e fazendas, escolas rurais, postos de saúde, centros comunitários, pousadas, estações de telecomunicações, bombeamento de água, em barcos e em um grande número de outros locais distantes das redes elétricas (SOLENERG, 2009). O uso bem-sucedido da energia solar pode

ser observado em calculadoras eletrônicas, relógios, carregadores de pilhas, lanternas e rádios, representados por serem sistemas autônomos de reduzida dimensão.

O dimensionamento dos outros módulos do sistema (módulo fotovoltaico, armazenamento, controle de energia) depende do número de dispositivos, da potência elétrica e do tempo de operação diária dos mesmos.

A Tabela 5 apresenta um comparativo de potência (W), horas diárias (h/d) de utilização e consumo diário (Wh/dia), de três equipamentos eletrônicos residenciais.

	A	B	AxB
Aparelho	Watt	hora/dia	Wh/dia
lâmpada	9	4	36
tv à cores	45	3	135
rádio	6	2	12
total	60	--	183

Tabela 5 – Consumo de equipamentos residenciais (SOLENERG, 2009)

2.4 Soluções existentes

Com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento em redes sem fio em malha, com base no padrão IEEE802.11s, projetos na área acadêmica e comercial vêm sendo implementados de acordo com o interesse e demanda de cada instituição.

Esta seção descreve algumas das recentes pesquisas, implementações e avaliações na área de redes sem fio em malha, desenvolvidas por grupo de professores, pesquisadores e alunos do Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) e de outras universidades e institutos de pesquisa.

Durante o ano de 2007 o LSI esteve envolvido na avaliação da conectividade de protótipos desenvolvidos pelo MIT Media Lab., no escopo do projeto do governo brasileiro denominado Um Computador por Aluno (UCA), (MIRANDA, *et al.*, 2008), como uma alternativa de baixo custo para promover a inclusão digital e melhorar a educação em países pobres. Além deste projeto, o LSI vem estudando e desenvolvendo projetos ligados à fornecimento de internet sem fio em cidades no interior de São Paulo para interligação de prefeituras, hospitais, centros de saúde e escolas, com redes sem fio em malha.

O projeto *Roofnet* (BICKET, AGUAYO e BISWAS, 2005), desenvolvido com base em pesquisas aplicadas e experiências com redes sem fio em malha do Laboratório de Ciência da Computação e Inteligência Artificial do MIT Media Lab. apresentou uma solução para o compartilhamento de Internet sem fio entre estudantes de graduação localizados próximos à

universidade. Cada estudante recebia um *kit* composto por um roteador convencional, operando com uma modificação do protocolo de roteamento DSR (*Dynamic Source Routing*) denominado SrcRR e uma antena para instalação no telhado da residência. Atualmente, os desenvolvedores deste projeto constituíram uma empresa denominada Meraki, que comercializa soluções de programas de roteamento proprietário para redes sem fio em malha.

O Projeto ReMesh (PASSOS *et al.*, 2006), desenvolvido pela UFF (Universidade Federal Fluminense) na cidade de Niterói no Estado do Rio de Janeiro, apresentou o desempenho de uma rede sem fio em malha, constituída por seis pontos de acesso e operando com uma versão modificada do protocolo de roteamento OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*).

No projeto MeshNet (RAMACHANDRAN, BELDING-ROYER e ALMEROTH, 2007) desenvolvido por alunos, pesquisadores e professores da Universidade da Califórnia, foi apresentado uma implementação de rede sem fio em malha operando com 25 pontos de acesso padrão IEEE802.11a/b/g e distribuídos por cinco andares do prédio da engenharia no *campus* da Universidade.

O Projeto CUWin (*Champaign-Urban Community Wireless Network*) desenvolvido por um grupo do UCIMC (*Urban-Champaign Independent Media Center*) na cidade de Urbana-Champaign em Illinois no EUA apresentou uma solução sem fins lucrativos de redes sem fio em malha para interligação de escritórios, escolas, universidades e residências da cidade. Os dois principais objetivos do projeto eram desenvolver programas embarcados em sistemas eletrônicos abertos e conectar mais pessoas à Internet e fornecer serviços de banda larga.

A Universidade de Twente (GREENLEE, 2006), na Holanda, desenvolveu uma infraestrutura de redes sem fio para o *campus* com 650 pontos de acessos conectados à Internet, fornecendo cobertura para mais de 6.000 alunos e 2.500 funcionários.

Na atualidade a energia solar tem sido utilizada em sistemas de irrigação, eletrificação residencial em áreas isoladas, parques ecológicos, áreas rurais desprovidas de energia elétrica, telefonia pública e de emergência em estradas e rodovias (CRESESB, 1999). Além destas aplicações, a energia solar fotovoltaica está sendo aplicada em projetos de redes sem fio, com base no padrão IEEE802.11, para transmissão de informação por protocolo de Internet.

De acordo com o trabalho de FARBOR e TODD (2007), o projeto SolarMESH foi desenvolvido pela Universidade McMaster no Canadá e apresenta um sistema de comunicação sem fio, padrão IEEE802.11b/g, alimentado por energia solar. O objetivo deste

sistema é interligar os prédios da universidade por uma rede de comunicação sem fio em malha e disponibilizar cobertura Wi-Fi para o *campus*.

Iniciado em 2002, o projeto SolarMESH foi apoiado pelo Conselho de Ciências Naturais e Engenharia do Canadá (NSERC), que incentiva pesquisas em inovação por todo o país. Além do NSERC, o projeto contou com a participação do RIM (*Research in Motion*) e CITO (*Communication and Information Technology Ontario*), representados respectivamente por uma empresa líder no mercado de inovações em redes sem fio e por um centro de excelência em tecnologia de informação do Canadá.

A Figura 29 ilustra o protótipo desenvolvido pelo grupo de redes sem fio da Universidade McMaster e supervisionado pelo professor Terry Todd. De acordo com a figura é possível observar a utilização de um módulo fotovoltaico de silício poli-cristalino, módulo de comunicação para redes sem fio em malha e módulo de armazenamento, não especificados pelo grupo de desenvolvimento e antena omnidirecional com ganho de 8 dBi.

Figura 29 – Protótipo *SolarMesh* (SOLARMESH, 2002)

Em 2003, quatro protótipos do projeto SolarMESH foram instalados no telhado de quatro prédios da Universidade McMaster. A Figura 30 ilustra o plano final da rede sem fio com um total de seis pontos de acesso distantes em média de 200 m.

Figura 30 – Topologia do projeto (SOLARMESH, 2002)

Segundo TODD, SAYEGH, SMADI e ZHAO (2008), o projeto *Solar Wi-Fi Grid* foi desenvolvido pela organização sem fins lucrativos Green Wi-Fi e apresenta um sistema de comunicação sem fio compacto, padrão IEEE802.11b/g, alimentado por energia solar, como alternativa de baixo custo para promover a inclusão digital em países subdesenvolvidos.

De acordo com o co-fundador e CEO da organização Green-WiFi, Bruce Baikie, o projeto *Solar Wi-Fi Grid* foi fundamentado em dois trabalhos desenvolvidos pelo MIT Media Lab., o *One Laptop per Child* (OLPC PROJECT, 2005) e o *RoofNet* (BICKET, AGUAYO E BISWAS, 2005).

A Figura 31 ilustra os componentes que fazem parte do sistema desenvolvido pela organização Green-WiFi. É utilizado um roteador Linksys operando com sistema operacional Linux e protocolo de roteamento desenvolvido pelos alunos do MIT no projeto *Roofnet*, antena omnidirecional de 5 dBi, painel solar de 10 W, módulo de armazenamento composto por uma bateria de gel com capacidade de 20 Ah e controlador de carga microprocessado, com programa embarcado desenvolvido pela organização, que controla os períodos de liga e desliga do módulo de comunicação com o objetivo de aumentar a autonomia do sistema.

Figura 31 – Protótipo *WiFi Grid Project* (GREEN-WIFI, 2006)

De acordo com a Meraki (2007), empresa constituída pelos desenvolvedores do projeto *RoofNet* no MIT Media Lab., e pioneira na venda de dispositivos para redes sem fio em malha, o sistema de comunicação sem fio alimentado por energia solar desenvolvido e comercializado atualmente pela companhia fornece extensa cobertura de redes sem fio, sem custo com cabos de energia elétrica e de fácil instalação em postes e paredes de concreto.

Figura 32 – Produto Meraki Solar (MERAKI, 2008)

A Figura 32 ilustra o sistema desenvolvido pela organização Meraki. De acordo com a especificação da Meraki, este sistema utiliza um módulo de comunicação operando com um programa de roteamento embarcado na plataforma, desenvolvida e licenciada pela organização, antena omni de 2 dBi, painel solar de 20 ou 40 W, dependendo do local da instalação, módulo de armazenamento composto por bateria de fosfato de íons de lítio, com capacidade não divulgada e controlador de carga também não divulgado pela organização.

A Tabela 6 apresenta um comparativo dos aspectos mais relevantes dos sistemas apresentados.

Tabela 6 – Comparativo entre os sistemas de comunicação solares

Comparativo entre as soluções	SolarMesh	Green WiFi	Meraki Solar
Ano	2003	2006	2009
Tecnologia de redes sem fio	802.11b/g	802.11b/g	802.11b/g
Módulo de comunicação sem fio	*	Linksys	Meraki
Ganho da antena omni (dBi)	8	5	2
Protocolo de roteamento	*	Roofnet (Srcr)	Meraki
Fabricante do painel solar	*	Shell	*
Potência do painel solar (W)	*	10	20/40
Módulo de controle de energia	*	Morningstar	Meraki
Material da bateria	Chumbo-ácido	Chumbo-ácido	Íons de lítio
Capacidade da Bateria (Ah)	*	20	*
Local de instalação	Telhados	*	Paredes, postes
Disponibilidade do sistema (h/dia)	*	8 / 4	24 / 7
Autonomia com ausência de luz (dias)	*	28	*

*Informações não disponibilizadas pelos desenvolvedores.

Com base na referida tabela e considerando que não se tem acesso, durante pesquisa, aos sistemas mencionados, não foi possível efetuar uma avaliação profunda de desempenho, o que dificultou a comparação técnica entre os sistemas.

O que se observa, a partir dos dados da Tabela 6, é que todos seguem a mesma configuração básica de um sistema fotovoltaico, sendo composto por um módulo fotovoltaico, de armazenamento, de controle e pelo módulo a ser alimentado. Os sistemas utilizam protocolo de roteamento para redes sem fio em malha que operam com base no padrão IEEE802.11b/g, definido como o padrão mais disseminado em dispositivos móveis na atualidade. Além disso, os sistemas utilizam antena omni com o objetivo de espalhar o sinal de radiofrequência para todas as direções.

Capítulo 3

Proposta de Sistema de Comunicação Sem Fio em Malha Alimentado por Energia Solar Fotovoltaica

Como visto no capítulo anterior, já é possível encontrar soluções de pontos de acesso alimentados por energia solar. Porém, as soluções encontradas foram desenvolvidos por instituições e organizações estrangeiras que não disponibilizam todas as informações técnicas sobre os dimensionamentos efetuados. Cabe salientar a ausência de sistemas de comunicação Wi-Fi alimentados por energia solar no Brasil, desenvolvidos com tecnologia nacional.

Este capítulo apresenta a proposta de um sistema de comunicação sem fio em malha, alimentado por energia solar, levando em consideração os principais requisitos para definição de cada módulo do sistema de forma a conceber um protótipo funcional, respeitando aspectos de autonomia de energia, taxas de transmissão, cobertura, eficiência e facilidade de manutenção e instalação em área rural e urbana.

3.1 Descrição geral do sistema

Como ilustrado na Figura 33, um sistema de comunicação sem fio em malha alimentado por energia solar é composto por um conjunto de quatro módulos: módulo de comunicação, módulo fotovoltaico, módulo de armazenamento e módulo de controle de energia.

Figura 33 – Diagrama de blocos do sistema proposto

O módulo de comunicação é responsável por estabelecer uma malha de comunicação sem fio, com múltiplas rotas, entre os outros módulos de comunicação da rede e fornecer cobertura Wi-Fi para as estações no raio de alcance do sinal transmitido por cada módulo de comunicação.

O módulo fotovoltaico é o elemento gerador de eletricidade, em corrente contínua, para todo o sistema, a partir da transformação direta da luz em energia elétrica.

Em sistemas autônomos é necessário acumular energia, para compensar as diferenças existentes ao longo do tempo, entre a produção de energia do módulo fotovoltaico e a utilização da energia armazenada. As baterias recarregáveis são consideradas apropriadas para o módulo de armazenamento.

A utilização do módulo de armazenamento obriga a utilização de um módulo de controle de energia adequado, que faça a gestão do processo de carga, de forma a proteger e garantir uma elevada confiabilidade e um maior tempo de vida útil do módulo de armazenamento.

Nas próximas seções serão apresentadas as especificações técnicas mínimas para a definição dos módulos do sistema. Foram consideradas as normas do IEEE, a norma da ANATEL, a norma da Aliança Wi-Fi, relatório de testes referentes ao projeto RUCA (Rede Um Computador por Aluno) e o *Manual Fotovoltaico* referente ao projeto GREENPRO, o qual visou promover a utilização das fontes de energia renováveis no espaço Europeu. Foram consideradas também, características físicas e dimensionais desejadas para cada módulo, bem como, estudos de caso, de diversas soluções de sistemas autônomos fotovoltaicos.

3.2 Requisitos do módulo de comunicação

Para a especificação do módulo de comunicação do sistema, deve-se levar em consideração os seguintes requisitos técnicos:

- operar com base nos padrões IEEE 802.11b/g;
- disponibilizar roteamento para rede sem fio em malha com base no padrão IEEE802.11s;
- disponibilizar sistema de criptografia para redes sem fio com base no padrão IEEE802.11i;

- estar de acordo com a potência máxima de transmissão definida pela ANATEL de 100 mW;
- baixo consumo de energia;
- operar em uma ampla faixa de tensão de alimentação;
- pequenas dimensões físicas;
- possibilitar troca de antena;
- disponibilizar gerenciamento e monitoramento remotos;
- operar em temperaturas na faixa de 0 a 40°C.

Com base em experiência adquirida em projetos de redes sem fio em malha e conhecimento em sistemas eletrônicos, foram propostos cinco cenários de utilização de uma rede sem fio em malha, com objetivo de permitir a avaliação do consumo do módulo de comunicação especificado para o sistema proposto.

3.2.1 Cenários de avaliação do módulo de comunicação

Cenário 1: Módulo energizado e iniciando sistema operacional, conforme apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Cenário 1 para avaliação elétrica do módulo de comunicação

Cenário 2: Módulo energizado e iniciando a procura por outros módulos de comunicação para estabelecimento da rede sem fio em malha, conforme Figura 35.

Figura 35 – Cenário 2 para avaliação elétrica do módulo de comunicação

Cenário 3: Módulo energizado, comunicação estabelecida com outros módulos de comunicação sem fio em malha e fornecendo cobertura para usuários acessando servidores *web*, conforme apresentando na Figura 36.

Figura 36 – Cenário 3 para avaliação elétrica do módulo de comunicação

Cenário 4: Módulo energizado, comunicação estabelecida com outros módulos de comunicação sem fio em malha e fornecendo cobertura para usuários acessando páginas da Internet e rodando fluxo de vídeo e áudio de servidores da Internet, conforme Figura 37.

Figura 37 – Cenário 4 para avaliação elétrica do módulo de comunicação

Cenário 5: Módulo energizado, comunicação estabelecida com outros módulos de comunicação sem fio em malha e fornecendo cobertura para usuários, acessando páginas da Internet e rodando fluxos de vídeo e áudio permanentemente (Consumo estimado máximo).

3.3 Requisitos do módulo fotovoltaico

Propõe-se que o dimensionamento e a especificação do módulo fotovoltaico tenham como premissas o atendimento às características elétricas do módulo de comunicação que estejam de acordo com os seguintes requisitos técnicos:

- estar de acordo com as condições de teste padrão (CTS), definidas com base nas normas IEC 60904 / DIN EM 60904, para poder se comparar os dados elétricos e curvas características em condições uniformes de teste, com irradiância de 1.000 W/m², temperatura de 25 °C com uma tolerância de + 2 °C e espectro de luz definido (distribuição do espectro da irradiância solar de referência de acordo com a norma IEC 60904-3) com uma massa de ar AM = 1,5;
- apresentar curva característica de acordo com as condições de teste padrão, bem como, as características básicas definidas em três pontos:
 - ponto de potência máxima (PPM) fornecido em W_p, definido como o ponto da curva característica em que a célula solar funciona à máxima potência. Para este ponto, estão especificadas a potência, tensão e corrente de potência máxima;

- corrente de curto-circuito ICC de aproximadamente 5% a 15% maior do que a corrente PPM. Com células *standard* cristalinas (10cm x 10cm) sob condições de referência CTS, a corrente de curto-circuito é cerca de 3 A;
- tensão do circuito aberto VOC registra, com células cristalinas, aproximadamente 0,5 a 0,6 V e, para células amorfas, aproximadamente 0,6 a 0,9 V.
- possuir robustez mecânica;
- ser leve e ter pequenas dimensões;
- suportar intempéries;
- apresentar facilidade de instalação em ambientes externos sujeitos a vento, chuva, granizo e prevenção contra vandalismo;
- possibilitar a instalação em locais elevados, de difícil acesso;
- utilizar células de silício mono-cristalino, em razão da maior eficiência em relação a outros materiais.

3.4 Requisitos do módulo de armazenamento

Propõe-se que o dimensionamento e a especificação do módulo de armazenamento tenham como premissas o atendimento as características elétricas do módulo de comunicação e que estejam de acordo com os seguintes requisitos técnicos:

- levar em consideração as 4 horas de insolação média diária anual em São Paulo com base no *Atlas Solarimétrico Brasileiro* (1998);
- levar em consideração a latitude e longitude de São Paulo, que é respectivamente de 23,55 e 46,63 e irradiação solar média anual de 4 KWh/m²;
- ter autonomia de 3 a 5 dias definido para os sistemas de telecomunicação;
- apresentar profundidade de no máximo de 50% (descargas mais profundas significam vida útil menor para a bateria). O valor normalmente adotado para baterias de chumbo ácido estacionária para sistemas fotovoltaicos é entre 50% e 60% (CRESESB, 1999);
- ter pequenas dimensões;
- operar 24 horas 7 dias por semana.

3.5 Requisitos para o desenvolvimento DO módulo de controle de energia

Para o desenvolvimento do módulo de controle de energia foram considerados os seguintes requisitos técnicos:

- tensão máxima que o controlador de carga permite à bateria alcançar. Neste ponto a corrente de carga deve ser interrompida (VR – *Voltage Regulation*);
- diferença entre o ajuste VR e a tensão que permite que a corrente de carga seja novamente reaplicada ao sistema (VRH – *Voltage Regulation Hysteresis*);
- tensão na qual a carga é desconectada do acumulador para prevenir descargas excessivas (LVD – *Low Voltage Disconnect*);
- diferença entre o ajuste LVD e a tensão que permite que a carga seja novamente acionada pelo usuário (LVDH – *Low Voltage Disconnect Hysteresis*);
- tensão de alimentação, mínima e máxima, do módulo de comunicação sem fio em malha especificada pelo fabricante;
- tensão de alimentação do módulo de comunicação, compatível com as características da tensão de saída do painel fotovoltaico;
- corrente e potência consumida pelo módulo de comunicação em diferentes cenários de operação;
- tensão de carga e descarga do módulo de armazenamento para definição da tensão de flutuação de carga das baterias;
- Considerar rendimento do módulo de controle de 90%, para efeitos de dimensionamento, valor definido para a maioria dos controladores existentes.

3.6 Conclusões

Este capítulo apresentou as características de cada módulo de um sistema de comunicação sem fio em malha, alimentado por energia solar e o levantamento de requisitos para a especificação dos módulos do sistema proposto, com base em padrões, normas e especificações, apresentou também a definição dos cenários propostos para a avaliação elétrica do módulo de comunicação que será utilizada como base para o dimensionamento dos outros módulos do sistema.

Capítulo 4

Testes e Avaliação dos Resultados do Módulo de Comunicação Sem Fio

Este capítulo é dedicado à escolha do módulo de comunicação do sistema proposto, de acordo com os requisitos especificados no capítulo anterior.

Com base nos requisitos e nos cenários de utilização de uma rede sem fio em malha propostos no Capítulo 3, este capítulo apresenta os resultados dos testes e avaliação das características elétricas do módulo de comunicação.

Esta avaliação irá possibilitar o detalhamento técnico e fornecer os subsídios para o dimensionamento dos módulos fotovoltaico, de armazenamento e de controle de energia do sistema.

4.1 Escolha do Módulo de comunicação sem fio em malha do sistema

Com base na colaboração acadêmica entre o LSI-EPUSP e o MIT Media Lab. e a organização sem fins lucrativos OLPC, no âmbito do projeto do governo brasileiro denominado UCA, como uma alternativa de baixo custo para promover a inclusão digital e melhorar a educação no Brasil, foi possível ter acesso ao módulo de comunicação para redes sem fio em malha recomendado pelo Dr. Michail Bletsas, responsável pela conectividade do projeto OLPC, denominado Meraki míni.

O LSI elaborou uma proposta para implementação de rede sem fio em malha nas dependências da escola-piloto do Estado de São Paulo, utilizando a tecnologia Meraki. Estes testes tiveram como objetivo disponibilizar redes sem fio nas dependências internas da escola para comunicação dos *laptops* do projeto OLPC com o servidor interno e Internet.

A partir desta colaboração e dos requisitos levantados no capítulo anterior, o módulo de comunicação Meraki míni foi escolhido dentre outras alternativas avaliadas para o sistema proposto e suas principais características técnicas são:

- consumo máximo de 3 W;
- opera com tensões na faixa de 4,5 a 18 V;
- ter dimensões de 63 mm x 114 mm x 29 mm;

- ter antena omnidirecional de 2 dBi;
- opera com base nos padrões IEEE802.11b/g;
- suporte ao padrão IEEE802.11i;
- opera com protocolo de roteamento para redes sem fio em malha com base no padrão IEEE802.11s;
- disponibiliza gerenciamento e monitoramento remoto por meio de uma interface *web*;
- opera com potência de transmissão de 100 mW (20 dBm);
- suportar temperaturas entre 0 °C e 40 °C.

4.2 Ambiente para avaliação elétrica do módulo de comunicação

Para avaliação das características elétricas do módulo de comunicação sem fio em malha foram levantados experimentalmente os parâmetros de tensão (V) e corrente (I) em períodos de 2 horas, sendo apresentada avaliação elétrica nos gráficos com amostras de 60 segundos.

A partir dos valores de tensão e corrente, foram calculados os parâmetros de potência (W), energia (W.h), potência máxima instantânea no período (W), potência média no período (W) e energia por dia (W.h/dia).

As medidas foram efetuadas utilizando um multímetro digital modelo Protek 506 true RMS com saída serial RS232 executando o *software* Protek 506 V2.03 para armazenamento e registro gráfico dos dados no computador Figura 38 e de acordo com as seguintes especificações:

Tensão DC

Faixa: 400 mV, 4V, 40V, 400V, 1000V

Resolução 0,1mV, 1mV, 10mV, 100mV, 1V

Precisão: 0,5% + 2 dígitos

Corrente DC

Faixa: 400μA, 400 mA, 20A

Resolução: 0.1μA, 0.1mA, 0.01A

Precisão: 1% +2 dígitos

Figura 38 – Equipamentos utilizados na avaliação do módulo de comunicação

4.3 Variação de tensão

A Figura 39 apresenta o resultado da avaliação de tensão para os cinco cenários de testes propostos no capítulo 3.

Figura 39 – Variação de tensão

Durante a avaliação da tensão para o Cenário 1, representado pela inicialização do sistema operacional embarcado no módulo de comunicação, não foi verificada alteração da tensão de 7,5 V.

Durante a avaliação da tensão para o Cenário 2, representado pelo estado de procura do módulo de comunicação conectado à rede de dados cabeada, também conhecido como *gateway*, para estabelecimento da rede sem fio em malha, foi verificada variação da tensão entre 7,45 V e 7,46 V.

Além disso, foi verificado que o tempo até o módulo alterar do estado de inicialização até o estado de comunicação com outros módulos (Cenário 2) é de aproximadamente 1 minuto.

No Cenário 3, representado pela autenticação de dois usuários na rede em malha estabelecida e acessando servidores *web*, foi verificada mínima variação de tensão em comparação com o Cenário 2.

4.4 Variação de corrente

A Figura 40 mostra a variação de consumo de corrente para os cinco cenários de utilização.

Figura 40 – Variação de corrente

Para o Cenário 1, foi verificado que a corrente do módulo se manteve em 0,24 A com pequenas variações em função do início das transmissões do sinal de sincronização, transmitido pelo módulo de comunicação.

No Cenário 2, pode-se verificar aumento de corrente em relação ao Cenário 1 na ordem de 50 mA com valor médio de 0,29 A, em função de o módulo monitorado iniciar a procura do módulo com acesso à rede externa – *gateway*.

No Cenário 3, pode-se verificar acréscimo na corrente no módulo que fornece cobertura para os computadores, resultando em um valor médio de 0,30 A e máximo de 0,36 A.

No Cenário 4, foi constatado, durante todo o tempo de avaliação, valor médio de corrente de 0,32 A. Porém, durante aproximadamente 12 segundos de transmissão de vídeo, foi verificado um valor médio de 0,35 A, chegando a valores máximos de 0,4 A.

Para o Cenário 5, a corrente se manteve em 0,4 A, assim, observa-se um consumo de 0,4 A com base nos valores máximos estimados a partir do Cenário 4.

4.5 Variação de potência

A Figura 41 apresenta a variação de potência (W) para os cinco cenários especificados.

Figura 41 – Variação de potência

Para o Cenário 1, foi verificado que a potência do módulo se manteve em 1,8 W, com pequenas variações da potência em função da inicialização do módulo de comunicação.

No Cenário 2, podemos verificar que potência do módulo de comunicação se manteve em 2,2 W, apresentando um acréscimo de 380 mW na potência do módulo de comunicação monitorado em relação ao Cenário 1. Este acréscimo representa o início da busca do módulo de comunicação conectado à rede externa – *gateway* – para estabelecimento da rede sem fio em malha.

No Cenário 3, foi verificado, mesmo estando os dois usuários acessando servidores *web*, um pequeno acréscimo de potência na ordem de 60 mW, sendo apresentado um valor médio de 2,26 W com máximo de 2,69 A e mínimo de 2,16 W.

Pode-se verificar no Cenário 4, valores máximos de 2,9 W com média de 2,40 W, que correspondem à demanda de potência do módulo monitorado durante o acesso aos *streaming* de vídeo e áudio.

O Cenário 5 representa a potência máxima do módulo de comunicação, que corresponde a 3,0 W. Este valor foi baseado nos máximos valores de potência constatados na avaliação do Cenário 4.

4.6 Síntese da avaliação elétrica do módulo de comunicação

A Tabela 7 apresenta a síntese das avaliações efetuadas para os cinco cenários propostos, que serão utilizados como base para o dimensionamento do módulo fotovoltaico, módulo de armazenamento e módulo de controle de energia.

Os valores obtidos da energia consumida por dia é o resultado do produto entre a potência média e o período de 24 h, conforme apresentado na equação abaixo:

$$\text{Energia por dia} = [(P_{\text{média}} * 24h)] \text{ W.h/dia}$$

Características elétricas	Cenários				
	1	2	3	4	5
Tensão média (Vdc) Erro: 0.5%	7,50	7,46	7,46	7,46	7,5
Corrente média (A) Erro: 1%	0,24	0,29	0,30	0,32	0,40
Potência média no período (W)	1,80	2,16	2,24	2,40	3,0
Potência máxima instantânea no período (W)	2,18	2,54	2,69	2,90	3,0
Energia por dia (W.h/dia)	43,20	51,48	53,76	57,60	71,52

Tabela 7 – Comparativo das características elétricas para os cinco cenários

4.7 Conclusões

Este capítulo apresentou os resultados e avaliações das características elétricas do módulo de comunicação sem fio em malha especificado para o sistema, de acordo com os requisitos propostos no capítulo anterior.

O que se observa, avaliando a

Tabela 7, é que os cenários 3 e 4 representam situações em que o módulo de comunicação opera a maior parte do tempo em função da variação de aplicações de baixo e alto consumo de banda, definidos para estes cenários.

Avaliando os cenários 3 e 4, verificamos que as variações de corrente, potência e energia por dia entre estes representam aproximadamente 10% de aumento, sendo um valor considerável para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos.

Levando em consideração a possibilidade de aplicações que demandem alto consumo de banda, o Cenário 4 será utilizado para dimensionamento dos outros módulos do sistema proposto, por caracterizar melhor a condição de operação normal do módulo de comunicação.

Capítulo 5

Dimensionamento e Implementação do Sistema

A partir da avaliação elétrica do módulo de comunicação efetuada no capítulo anterior, neste capítulo serão apresentados o dimensionamento e a especificação do módulo fotovoltaico, de armazenamento e de controle do sistema proposto, considerando o Cenário 4, que representa a condição normal de operação do módulo de comunicação.

A partir do dimensionamento e especificação do módulo fotovoltaico, armazenamento e de controle, este capítulo descreve também os procedimentos para implementação do sistema de comunicação sem fio em malha, alimentado por energia solar.

5.1 Dimensionamento e especificação do módulo de armazenamento

Para a especificação do módulo de armazenamento foi considerada a utilização de baterias de ácido de chumbo seladas, reguladas por válvula, por possuírem a melhor relação preço-eficiência, bem como, tensão e correntes de carga estáveis. As outras baterias são utilizadas com menor frequência em função de seu custo elevado.

Embora os requisitos considerem o sistema ativo 24 horas por dia com autonomia de 3 (72 horas) a 5 (120) dias, será apresentada também projeção de autonomia de 36 horas, que representa 1,5 dia, por questões de comparação da capacidade e peso do módulo de armazenamento.

A Tabela 8 apresenta o dimensionamento do módulo de armazenamento quanto aos requisitos de autonomia, disponibilidade do sistema, descarga da bateria e resultados da avaliação do módulo de comunicação sem fio.

Tabela 8 – Dimensionamento do módulo de armazenamento

Dimensionamento do módulo de armazenamento	Autonomia		
Autonomia desejada do sistema (h) = (dias)	36 = 1,5	75 = 3	112 = 5
Consumo do sistema para autonomia desejada 36/75/112 Ah	11,52	24	35,84
Capacidade mínima de bateria - 50% de descarga Ah	23,04	48	71,68

A Tabela 8 considera em todos os casos o Cenário 4 (corrente média=0,32 A) e disponibilidade do sistema de comunicação 24 h/dia, o que corresponde a um consumo do módulo de comunicação de 7,68 Ah/dia.

Apesar de na proposta constar como requisito uma autonomia de 3 a 5 dias, para o primeiro protótipo adotou-se uma autonomia de 1,5 dias (36 horas) para que as dimensões e peso do protótipo com o tipo de bateria não se tornasse impraticável. Assim, foram selecionadas duas baterias UP6120 reguladas por válvula, com as seguintes especificações técnicas apresentadas na Tabela 9.

Módulo de armazenamento	
Fabricação	China
Empresa	Unipower
Tecnologia	Chumbo-ácido VRLA
Vida útil (anos)	3
Dimensões (mm)	150 x 50 x 100
Peso (kg)	1,85
Capacidade (Ah)	12
Tensão (V)	6
Tensão flutuação (V)	6,8 – 6,9
Tensão cíclica (V)	7,2 – 7,35
Corrente (A)	4,8 máx.
Preço unitário (R\$)	71,50

Tabela 9 – Especificação do módulo de armazenamento do sistema

5.2 Dimensionamento e especificação do módulo fotovoltaico

Para a especificação do módulo fotovoltaico, optou-se pelo tipo feito com células de silício mono-cristalino por possuir maior eficiência em relação aos outros materiais, estar de acordo com as condições de teste padrão (CTS), apresentar curva característica de acordo com as condições de teste padrão, possuir pequenas dimensões, ter módulo de controle de energia com rendimento de 90% e ser fabricado no Brasil.

Para o dimensionamento do módulo fotovoltaico pode-se verificar, conforme Tabela 7, para o Cenário 4, que o consumo de energia do módulo de comunicação é de 57,60 W.h/dia. Este consumo é a potência total solicitada pelo módulo de comunicação, não considerando a recarga do módulo de armazenamento e o rendimento do módulo de controle de energia.

Considerando o rendimento do módulo de controle em 90%, o consumo passa para 64 W.h/dia. Desta forma, o módulo fotovoltaico com capacidade mínima para atender os 64

W.h/dia deveria ser de 16 W, que em 4 horas de insolação diária teria uma capacidade de 64 W.h/dia. Porém, este módulo fotovoltaico não teria capacidade de recarga das baterias do módulo de armazenamento.

Em função do exposto, foi especificado um módulo fotovoltaico de 21 W, que em 4 horas de insolação diária teria uma capacidade de 84 W.h/dia, possibilitando assim a recarga do módulo de armazenamento.

A partir dos requisitos definidos e priorizando a fabricação nacional, foi selecionado um painel solar HM-21D6, da empresa Heliodinâmica, com as especificações técnicas conforme Tabela 10 e curvas características de operação de acordo com a Figura 42.

Tabela 10 – Especificação do módulo fotovoltaico do sistema

Módulo fotovoltaico	
Fabricação	Nacional
Empresa	Heliodinâmica
Tecnologia	Silício mono
Vida útil (anos)	30
Eficiência (%)	15
Dimensões (mm)	547 x 402 x 45
Peso (kg)	3,1
Potência (W)*	21
Tensão (V)*	8,5
Corrente (I)*	2,46
Corrente de curto-circuito (A)	1,34
Tensão de circuito aberto (V)	10,5
Temperatura de op.	-55 °C a +60 °C
Umidade relativa (%)	100
Altitude (m)	7000
Ventos (km/h)	200
Preço (R\$)	760,00

* Especificações médias, sob radiação solar de 1000 W/m² AM 1.5 e temperatura de 25 °C, sujeitas a variações de 10%

Figura 42 – Curvas características $I \times V$ a 45 °C (HELIODINÂMICA, 2008)

5.3 Dimensionamento e desenvolvimento do módulo de controle de energia

De acordo com o apresentado no item 2.3.3.3, o módulo de controle de energia proposto especificamente para este sistema pode ser caracterizado como controlador “*On/Off*” com redundância de alimentação do módulo de comunicação pelo módulo fotovoltaico e/ou módulo de armazenado.

Conforme especificado pelo fabricante, o módulo de comunicação deve possuir uma fonte de alimentação externa, que disponibiliza uma tensão fixa de 7,5 V_{DC} a partir da conversão de 127 V_{AC} ou 220 V_{AC} da rede de energia elétrica, porém, o mesmo pode operar com tensões entre 4,8 V_{DC} e 18 V_{DC}. Para o desenvolvimento do módulo de controle de energia, foi utilizada como referência a tensão de 7,5 V_{DC}, definida pelo fabricante.

O módulo de controle de energia foi desenvolvido para manter a tensão de alimentação do módulo de comunicação estabilizada em 7,1 V_{DC} ao invés de 7,5 V_{DC}, por limitação do conversor DC/DC utilizado na placa de controle, não afetando o desempenho para alimentação do módulo de comunicação que opera entre 4,8 V_{DC} e 18 V_{DC}.

Quando a tensão para a alimentação do módulo de comunicação fornecida pelo módulo de controle atinge 6,8 V_{DC}, o módulo de controle leva para nível de tensão 0 V_{DC} a alimentação do módulo de comunicação. Este nível de tensão corresponde a uma tensão de entrada do módulo de controle inferior a 4,5 V_{DC}.

Para gerenciar a transferência de energia do módulo fotovoltaico para o módulo de armazenamento e garantir o ciclo de carga e descarga na tensão de flutuação das baterias de 6,8 a 6,9 V_{DC} conforme Tabela 9, foi previsto no desenvolvimento do módulo de controle de energia a carga individual das baterias a partir da tensão máxima fornecida pelo módulo fotovoltaico de 8,5 V_{DC} em carga conforme Tabela 10.

Levando em consideração as limitações do módulo fotovoltaico em carga e tensão máxima para carga de bateria de 7,35 V_{DC}, o módulo de controle de energia desenvolvido, manterá permanentemente durante o período de insolação a carga da bateria não ultrapassando o valor máximo e ao mesmo tempo alimentado o módulo de comunicação.

A principal vantagem e inovação do módulo de controle de energia desenvolvido é de garantir a operação do módulo de comunicação no mínimo 8 horas por dia, com mínima insolação e módulo de armazenamento com níveis mínimos de carga limitados em 5 V_{DC}, sem comprometer a vida útil das baterias.

A Figura 43 ilustra o módulo de controle de energia desenvolvido. Foram utilizados componentes discretos visando o mínimo custo e facilidade de correções durante os testes.

Figura 43 – Módulo de controle de energia desenvolvido

A Figura 44 apresenta a integração dos módulos do sistema de comunicação sem fio em malha, proposto neste trabalho.

Figura 44 – Diagrama de blocos dos módulos do sistema

5.4 Montagem e instalação do sistema

Para integração dos módulos em um protótipo compacto e de fácil instalação, foram definidos sete procedimentos descritos a seguir.

Procedimento 1: Utilizar uma caixa de montagem de ferro galvanizado com 300 mm de comprimento, 200 mm de largura e 180 mm de profundidade, como mostrado na Figura 45.

Figura 45 – Caixa de montagem

Procedimento 2: Inserir duas baterias no fundo da caixa e fixar com abraça-duto, conforme Figura 46.

Figura 46 – Fixação das baterias

Procedimento 3: Instalar o módulo de comunicação sem fio em malha, efetuando um furo de 10 mm na parte inferior da caixa, para passagem da antena, conforme ilustrado na Figura 47.

Figura 47 – Fixação do módulo de comunicação

Procedimento 4: Para fixação do módulo fotovoltaico na caixa de montagem, foi utilizado um minitubo de ferro galvanizado com 500 mm de comprimento e 90 mm de diâmetro, através de duas braçadeiras metálicas, permitindo a integração bem estruturada do módulo fotovoltaico com a caixa de montagem, conforme Figura 48.

Figura 48 – Miniposte de fixação

Procedimento 5: Para transferir a energia em corrente contínua, fornecida pelo módulo fotovoltaico ao módulo de controle de energia e módulo de armazenamento, foi utilizado um cabo de 1,50 m de comprimento e bitola de $2,5 \text{ mm}^2$, conforme Figura 48. Uma das extremidades do cabo foi conectada aos terminais positivo e negativo do módulo fotovoltaico e a outra extremidade transferida para dentro da caixa de montagem através do miniposte, conforme Figura 48. Pode-se observar na Figura 48, que foi utilizada uma prensa-cabo para proteger o cabo e impedir a entrada de insetos e água, que poderiam comprometer o funcionamento do sistema.

Procedimento 6: Efetuar as conexões entre os diversos módulos do sistema, de acordo com a identificação definida no módulo de controle, utilizando terminais garfo, conforme Figura 49, facilitando manutenção.

Figura 49 – Fixação do módulo de controle de energia

Procedimento 7: Para instalação do primeiro sistema foi escolhido um poste de iluminação situado na Escola Politécnica na USP, levando em consideração que o módulo fotovoltaico deve estar orientado na direção Norte com inclinação entre 25° e 30 ° para que tenha total exposição a luz solar durante todo o período diurno. A precisão não é rigorosa, portanto pode ser ajustado por aproximação.

5.5 Comportamento energético do sistema

A Tabela 11 apresenta uma simulação do comportamento energético do sistema, considerando módulo de armazenamento 100% carregado e insolação de 4 horas/dia, durante um período de sete dias com ausência de insolação no terceiro dia.

Tabela 11 – Balanço energético no período de 7 dias com o 3º dia sem insolação

Status dos módulos do sistema proposto	1º Dia	2º Dia	3º Dia	4º Dia	5º Dia	6º Dia	7º Dia
Estado de carga da bateria inicial (Ah)	24	17.60	17.60	12.48	14.40	16.32	17.60
Percentual de carga da bateria inicial (%)	100	73	73	52	60	68	73
Período de insolação diária (h)	4	4	0	4 ^(c)	4	4	4
Corrente do módulo de comunicação (A)	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Consumo do módulo de comunicação no período de 4 horas (Ah)	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
Corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico (FV) (A)	0.50 ^(a)	1.92	0	2.40	2.40	2.24	1.92
Energia fornecida pelo módulo FV no período de insolação (Ah)	2.00	7.68	0	9.60	9.60	8.96	7.68
Recarga do módulo de armazenamento (Ah)	0.72	6.40	0	8.32	8.32	7.68	6.40
Estado da carga da bateria após período de 4 horas (Ah)	24	24	16.32	20.8	22.72	24	24
Percentual de carga após período de insolação (%)	100	100	68	87	95	100 ^(d)	100
Período sem insolação (h)	20	20	16	20	20	20	20
Corrente do módulo de comunicação (A)	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Consumo do módulo de comunicação no período sem insolação (Ah)	6.40	6.40	5.12	6.40	6.40	6.40	6.40
Estado da carga da bateria após período sem insolação (Ah)	17.60	17.6	12.48	14.4	16.32	17.60	17.60
Percentual de carga após 20 horas de insolação (%)	73	73	52 ^(b)	60	68	73	73

Notas da Tabela 11

^(a) $0,18A = 0,50A - 0,32$ para recuperação da descarga interna do módulo de armazenamento.

^(b) Módulo de comunicação após 36 horas sem insolação é desativado.

^(c) Módulo de comunicação é ativado no início do período de insolação.

^(d) Módulo de armazenamento atinge 100% de carga após 3 dias de insolação de 4 horas.

5.6 Conclusões

Este capítulo apresentou o dimensionamento e a especificação dos módulos fotovoltaico e de armazenamento, bem como as premissas para o desenvolvimento do módulo de controle de energia do sistema, com base nos resultados e avaliações das características elétricas do módulo de comunicação.

Foram abordados também os procedimentos para a implementação e instalação do protótipo proposto. Este protótipo irá possibilitar a avaliação do comportamento dos módulos integrados e fornecer subsídios para futuras melhorias do sistema.

Capítulo 6

Testes, Resultados e Avaliação do Sistema

A partir do dimensionamento, especificação e desenvolvimento efetuados no capítulo anterior, neste capítulo serão apresentados testes de campo do sistema desenvolvido, fundamentado nas teorias de redes sem fio em malha e comportamento energético de sistemas autônomos. Apresenta-se também uma avaliação dos resultados coletados.

Os testes realizados buscam avaliar a viabilidade do sistema proposto em diferentes aspectos de energia e comunicação sem fio, relacionados à autonomia, área de cobertura, distância, número de usuários, número máximo de saltos, taxa de transferência e segurança da informação.

Foram utilizadas ferramentas de monitoramento e gerenciamento *Web*, disponibilizadas pelo fabricante do módulo de comunicação, objetivando verificar a estabilidade do sistema e o comportamento em ambiente real de operação.

6.1 Autonomia

Um dos aspectos mais relevantes do sistema desenvolvido é sua autonomia na ausência de luz solar. A manutenção do sistema, ativo por mais de 3 dias de operação, 24 horas por dia, sem a presença de luz solar exigiria que o módulo de armazenamento e o módulo fotovoltaico possuísem maior capacidade e como consequência, maior custo, peso e dimensões físicas, que dificultariam a instalação.

Em países tropicais como o Brasil, a ausência da luz solar por um período de 3 dias é comum, principalmente em períodos de chuva.

Assim, a alternativa de manter o sistema ativo 12 horas por dia em vez de 24 horas por dia foi adotada, permite utilizar o protótipo proposto, possibilitando a operação do sistema com ausência da luz solar por mais 3 dias consecutivos.

Uma segunda alternativa para incrementar a autonomia do sistema, com ausência da luz solar por aproximadamente 5 dias consecutivos, é limitar a comunicação para os usuários em 8 horas por dia, utilizando a mesma arquitetura do protótipo proposto.

As alternativas mencionadas limitam a utilização do sistema em tempo integral, porém, técnica e economicamente viabilizam sua implementação, especialmente considerando o caso de instalação num ambiente como a Universidade em que a rigor não há uso noturno.

6.2 Área de Cobertura

Foram instalados dois sistemas em dois postes de iluminação localizados no *campus* da Universidade de São Paulo (USP), dentro do perímetro da Escola Politécnica.

A

Figura 50 apresenta a arquitetura da rede sem fio implementada e o local da instalação dos sistemas, que permitiram a transmissão do sinal sem perdas e cobertura em um raio de 300 m, de acordo com a especificação definida pelo fabricante do módulo de comunicação, para áreas abertas sem obstáculos.

Além dos dois sistemas desenvolvidos, a rede sem fio em malha implantada possui o dispositivo conectado à rede de dados cabeada, conhecido como portal em malha ou *gateway* da rede e o ponto de acesso em malha (MAP), ambos conectados à rede elétrica cabeada.

Figura 50 – Visualização da rede sem fio em malha solar – EPUSP

6.3 Altura mínima em função da distância entre sistemas

Um dos principais desafios na comunicação sem fio é não obstruir a Zona de Fresnel, definida para a radiação da antena, para não diminuir a potência do sinal recebido para estabelecimento da rede sem fio em malha.

De acordo com o físico Augustin-Jean Fresnel, a Zona de Fresnel é representada por ser um número, teoricamente infinito, de elipsóides concêntricos que definem o padrão de radiação por uma abertura circular.

A Figura 51 apresenta a Zona de Fresnel entre dois módulos de comunicação. O d representa a distância entre as antenas, b o raio da elipse e *Line of Sight* (LOS) representa a maior potência do sinal entre as antenas dos módulos de comunicação.

Figura 51 – Zona de Fresnel entre sistemas

Visando à maior cobertura do sinal transmitido por cada módulo de comunicação dos protótipos desenvolvidos, mínima interferência em obstáculos e segurança contra furtos e depredações, anteriormente à instalação dos protótipos foi calculada a altura mínima necessária livre de obstáculos que poderiam causar perda ou alteração de fase do sinal transmitido e descontinuidade da malha de comunicação sem fio, e que além disso, cumprissem a segurança física dos protótipos.

Para o estabelecimento das Zonas de Fresnel F_n , foi necessário determinar a linha direta, também conhecida como *Line of Sight* (LOS) entre os protótipos. A equação geral para cálculo do rádio da Zona de Fresnel no ponto central do *link* entre ambos os protótipos é definida por (1).

$$F_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1)$$

onde os símbolos, definições e as suas unidades são os seguintes:

F_n : Zonas de Fresnel (m)

d_1 : Distância de um sistema até o ponto central do *link* (m)

d_2 : Distância do outro sistema até o ponto central do *link* (m)

$n \lambda$: Comprimento de onda da frequência de operação (m)

Levando em consideração que as distâncias entre os postes definidos para instalação dos protótipos, na localidade da USP, estão a uma distância de 63 m e a frequência de operação dos módulos de comunicação é de 2,4 GHz, foi obtido o valor do raio da primeira Zona de Fresnel de 1,4 m, que representa a altura mínima para que não ocorra obstrução da Zona de Fresnel para uma distância de 63 m entre os sistemas.

A partir do valor resultante e prevenindo os protótipos de eventuais furtos, ambos foram instalados a uma altura de 6 m do solo, conforme apresentado na Figura 52a e Figura 52b.

Figura 52 – (a) e (b) Protótipo instalado em poste de iluminação a 6 metros de altura

6.4 Número de usuários

O limite máximo de usuários em uma rede sem fio depende da banda disponível e das aplicações utilizadas pelos usuários. Aplicações que consomem pouca banda, como navegação em *sites* da Internet, acesso a *e-mail* e bate-papo, não sobrecarregam a rede e possibilitam a conexão de centenas de usuários.

A utilização de aplicações multimídia (vídeo e VoIP), compartilhamento de arquivos (*peer-to-peer*), *downloads* de vídeos em alta definição e acesso a servidores de *streaming* provoca uma grande demanda por transmissão de dados, que resulta na diminuição do número

de usuários na rede com o objetivo de manter a qualidade do serviço demandado por estas aplicações.

Esse gerenciamento de tráfego, com base no número de usuários, pode ser efetuado de diversas maneiras, como bloqueio de aplicações, priorização de tráfego, limitação da banda por usuário, entre outras, permitindo assim, acesso confortável e inclusão de um maior número de usuários na rede.

Para prevenir utilização desnecessária de banda e possibilitar um maior número de usuários acessando a rede sem fio solar, foi utilizado o gerenciamento de tráfego disponibilizado pelo fabricante do módulo de comunicação que limita a banda por usuário. Considerando a operação dos módulos de comunicação da rede de acordo com o padrão IEEE802.11 b/g, que suporta taxas de transferências úteis de 22 Mbps e banda por usuário de 250 Kbps, cada protótipo poderia suportar até 88 usuários.

Nos testes em campo foi observado um número máximo de 15 (quinze) usuários simultâneos conectados no protótipo implementado, trafegando dados com taxas de transmissão na ordem de 500 Kbps.

6.5 Número máximo de saltos (*hops*)

O número de saltos, também conhecido como *hops*, representa o número de vezes que a informação transmitida pelo usuário é redirecionada entre os *Mesh Access Points* (nós) da rede em malha até o destino onde está localizado o *Mesh Portal Point (Gateway)*, conectado à Internet.

Conforme o fabricante do módulo de comunicação, os nós devem estar localizados no máximo a 4 saltos do *gateway*. Esta configuração irá permitir qualidade da conexão dos usuários com a Internet. Caso existam nós localizados a mais de 4 saltos do *gateway*, os usuários verificarão degradação, aumento da latência e baixa qualidade da comunicação.

Para a rede sem fio em malha solar implementada, podemos verificar na Figura 53 que os protótipos SAM Solar 1 e SAM Solar 2 estão localizados dentro do limite de 4 saltos de distância do *gateway* da rede.

Foi verificado que o SAM Solar 1, mesmo estando a 2 saltos de distância do *gateway* e a uma distância de 80 m do MAP, possibilitou a comunicação dos usuários com a Internet com taxas na ordem de 1 Mbps.

Figura 53 – Número de saltos da rede sem fio em malha solar (10/12/2008)

6.6 Taxas de transferência

Existem quatro principais fatores que devem ser considerados para a compreensão da taxa máxima de transmissão: a máxima taxa de transmissão disponibilizada pelo provedor de serviço, o número de usuários conectados simultaneamente, a limitação dos protocolos de comunicação dos padrões IEEE802.11b e IEEE802.11g e o número de saltos entre o usuário e a Internet.

A velocidade de comunicação para *download* e *upload* na Internet é determinada pelo provedor de serviço. Os provedores de serviço ADSL, *cable modems* disponibilizam bandas entre 1,0 e 6,0 Mbps.

Dependendo da aplicação que os outros usuários estejam processando na rede, as taxas de transmissão para *download* e *upload* podem afetar a velocidade da comunicação, resultando na degradação da qualidade da comunicação. As taxas de transmissão dos usuários na rede serão menores que 50% das taxas de transmissão definidas para os padrões IEEE 802.11b/g, respectivamente 11 Mbps e 54 Mbps.

O incremento de cada salto na rede reduz 50% da banda disponibilizada para o usuário, Por exemplo, se a banda disponibilizada pelo provedor de serviço for de 6 Mbps, a cada salto a banda será reduzida para 3 Mbps, 1,5 Mbps, 750 kbps, 375 kbps, até o quarto salto.

Para o caso da rede sem fio implementada, conforme Figura 54, foi verificado que o protótipo SAM Solar 1 estava funcionando com taxas de 1,2 Mbps a 2 saltos do *Gateway*, e o MAP operando com taxas de 5,2 Mbps.

Figura 54 – Taxa de transmissão (10/12/2008)

6.7 Segurança de informação

O gerenciador da Meraki disponibiliza duas formas de segurança para tráfego de informação na rede: *Public Wi-fi* e *Private Wi-fi*. As duas configurações operam com SSID e níveis de segurança diferentes.

O nível de segurança da rede *Public Wi-fi* opera com autenticação por *e-mail* e senha. Os *e-mails* dos usuários são cadastrados previamente no sistema de gerenciamento da rede. No momento em que o dispositivo do usuário detectar o sinal de qualquer um dos nós da rede sem fio em malha e requisitar o acesso, é apresentada uma página de autenticação com *e-mail* e *password* e cadastramento de novos usuários, conforme Figura 55.

Welcome
Mesh_LSI

IF YOU WANT TO ACCESS THE WIRELESS MESH NETWORK POWERED BY SOLAR ENERGY AND HELPS THE EXPANSION OF THIS TECHNOLOGY, SEND ME A E-MAIL TO JOIN THE SOLAR_NET. rherrero@lsi.usp.br

If you already have an account on this network, sign in here:

email

password

If you don't have an account yet, complete this form:

name

email

email (again)

password

password (again)

You will need to be on the list of authorized users for this network in order to access the Internet.

Figura 55 – Tela de acesso e cadastramento dos novos usuários (MERAKEI, 2009)

O nível de segurança da rede *Private Wi-Fi* opera independentemente da *Public Wi-Fi*. Sendo identificada por possuir SSID próprio, a rede privada fornece aos usuários altos níveis de segurança baseados no padrão IEEE802.11i.

A senha para acesso à *Private Wi-Fi* é gerada pelo administrador da rede e cada usuário que a possuir não terá limitações de banda, possibilitando a transmissão de informações sigilosas, codificadas em um dos protocolos mais seguros utilizados nas comunicações *Wi-Fi*.

6.8 Conclusões

Os testes realizados com o protótipo ajudaram a determinar o comportamento real do sistema em ambiente não controlado, sujeito a variações, intempéries e interferências ambientais. Após estes testes, pode-se concluir que as dimensões físicas e peso do sistema dependem de quantas horas queremos que o sistema esteja operando por dia e a autonomia com ausência de luz solar, questão já identificada e comprovada antes dos testes.

Após os testes realizados na área de cobertura, foi possível concluir que apesar de não ter sido efetuada uma extensiva avaliação dos limites do sinal de radiofrequência transmitido pelo módulo de comunicação, o teste foi importante por comprovar o raio de cobertura teórico

em áreas abertas, livre de obstáculos e interferências, bem como ser utilizado como referência para futuros projetos.

Após o dimensionamento da altura mínima de instalação do sistema, com o objetivo de não obstruir a Zona de Fresnel, foi possível concluir que o dimensionamento teve importância por servir como referência para a definição das distâncias máximas permitidas e altura de instalação de futuras implementações de redes sem fio em malha, utilizando o sistema desenvolvido, visando a mínima interferência em obstáculos e segurança contra furtos e depredações.

O número de usuários conectados ao sistema depende da banda disponível e das aplicações utilizadas, sendo teoricamente de 88 usuários no máximo por protótipo.

Uma vez realizados os testes do número máximo de saltos, pode-se concluir que apesar de não ter sido efetuada uma extensiva avaliação em diferentes configurações e distâncias, os testes tiveram importância por apresentarem valores reais das taxas de transmissão entre os sistemas autônomos de comunicação e o sistema com acesso físico à Internet. Sua aplicação será utilizada como referência para futuros projetos.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo apresentamos as considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros.

7.1 Contribuições

Embora já existam no momento da finalização deste trabalho sistemas autônomos de comunicação sem fio em malha, alimentados por energia solar, desenvolvidos por instituições e organizações estrangeiras, este trabalho apresenta um protótipo nacional de um sistema autônomo, compacto, de comunicação sem fio em malha, alimentado por energia solar fotovoltaica utilizando um módulo de comunicação importado, que se encontra operando na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Na área de comunicação sem fio, os subsídios fornecidos por este trabalho podem contribuir para o desenvolvimento de soluções tecnológicas locais da maior importância, já que podem propiciar a comunicação entre dispositivos fixos e móveis com suporte a redes sem fio em locais de difícil acesso, sem infraestrutura de rede elétrica e de rede de dados cabeada, possibilitando a inclusão digital em comunidades isoladas pela utilização da luz solar como fonte de energia inesgotável.

A presença de sistemas autônomos de comunicação sem fio em redes em malha, energizados por módulo fotovoltaico, poderá trazer a diversas famílias brasileiras a experiência do acesso à informação e inclusão digital, sem impacto ao meio ambiente e fomentar a utilização da *“energia solar renovável e não poluente, portanto, a energia do futuro”* (GOLDEMBERG, 2008).

A facilidade e baixos custos de instalação das redes sem fio em relação às redes cabeadas podem permitir a expansão significativa deste sistema de comunicação e da utilização da energia solar como fonte de energia alternativa.

Este trabalho gerou como contribuição foi a publicação do artigo “Sistema Autônomo de Comunicação Sem Fio em Malha Energizado por Energia Solar Fotovoltaica”, em 2008, no II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES

(*International Solar Energy Society*), realizado na Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis, do artigo (HERRERO *et al.*, 2008).

7.2 Trabalhos Futuros

O levantamento de dados apresentados nesta dissertação, relativos ao consumo de energia do módulo de comunicação, dimensionamento do módulo de armazenamento e do módulo fotovoltaico, abre possibilidades para novas pesquisas e desenvolvimentos dos módulos de comunicação, com o menor consumo de energia possível, que por sua vez permitem diminuir os módulos de armazenamento e fotovoltaicos, possibilitando maior autonomia, menor custo e, como consequência, maior eficiência.

Pretende-se fazer testes extensivos tanto em ambientes controlados em laboratório como em campo do sistema, envolvendo diferentes alternativas de módulo de armazenamento, fotovoltaico, de comunicação e controle, para testar a viabilidade de modificações que venham a diminuir as dimensões físicas e peso, bem como melhorar o desempenho do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMSON, N. **Development of the ALOHANET**, IEEE Transaction on Information Theory, v. 31, n. 2, 1985.
- Agência Nacional da Energia Elétrica, Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético – BEN 2004**. Disponível em <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 1 de janeiro de 2006.
- ALMEIDA, B.H. **O outro lado das telecomunicações: a saga do padre Landell**, Sulina/ARI, Porto Alegre, RS, 1983.
- BADAWY, G. SAYEGH, A. A. and TODD, T. D. **Solar Powered WLAN Mesh Network Provisioning for Temporary Deployments**, Accepted for publication, IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, NV, 2008.
- BARAK, M. **Electrochemical Power Sources: Primary and Secondary Batteries**, IET, 498 p. 1980.
- BASAGNI, S. CONTI, M. GIORDANO, S. STOJMENOVIC, I. **Mobile Ad hoc Networking**, Wiley-IEEE Press, 2004.
- BENDZ, E. FERNANDES, H. ZUFFO, M. **Visually Improved Understanding of Three-Dimensionally Propagating Electromagnetic Fields in Wireless Networks**, SIBGRAPI, 5-8 p. MG, Brazil, 2007.
- BENSAOU, B. WANG, Y. KO, C. C. **Fair medium access in 802.11 based wireless ad-hoc networks**. IEEE/ACM The First Annual Workshop on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc'00), Boston, EUA, 2000.
- BEZERRA, A.M. **A Energia solar – Sua contribuição na História da humanidade**, Disponível em: <<http://mourabezerra.sites.uol.com.br/energiaemeio2.htm>>, Acesso dia 8 de fevereiro de 2008.
- BICKET, J. AGUAYO, D. BISWAS, S. **Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network**, SIGMOBILE, 31-42 p. 2005.
- BISHOP, J. K. B. ROSSOW, W. B. **Spatial and temporal variability of global surface solar irradiance**, J. Geophys. Res. 96, 16839-16858 1991.
- BOLCSKEI, H. **MIMO-OFDM Wireless System: Basics, Perspectives, and Challenges**, Wireless Communication, IEEE, 31-37 p. 2006.

BRUTON, T.M. **General trends about photovoltaic based on crystalline silicon**, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 72 v. 1 n. 3-10 p. Elsevier, 2005.

CABRERIZO, E. A. **Instalaciones Solares Fotovoltaicas**. Progensa, 2002. 344 p.

CANÔNICO, M. A. **Acesso à Internet muda hábitos de cidade de 7.500 habitantes no interior de SP**. Disponível em

<<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u93212.shtml>>. Acesso em 8 de agosto de 2007.

CARRANO, R.C. BLETSAS, M. MAGALHÃES, L.C.S. **Mesh Networks for Digital Inclusion – Testing OLPC’s XO Mesh Implemetantion**, 8^o Forum Internacional de Software Livre, Porto Alegre, 2007.

CISCO SYSTEMS, **Aironet Wireless Training**, 2000.

COUTINHO, A. A. C. **Técnicas para aumento de banda disponível em redes em malha**, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, UFF, Rio de Janeiro, 2006.

CRABTREE, G. W. LEWIS, N. S. **Solar Energy Conversion**: Feature Article of American Institute of Physics, 37-42 p. Março de 2007.

CRESESB/CEPEL. Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, 1999. Rio de Janeiro.

DATAR, R.V. **Wifi and WIMAX - Break through in wireless access technologies**, Wireless, Mobile and Multimedia Networks IET International conference, 141-145 p. 2008.

DÍAZ, P. e LORENZO, E. **Solar Home System Battery and Charge Regulator Testing. Progress in Photovoltaics**. Research and Applications, Reino Unido: 9. ed. John Wiley & Sons. 2001. p. 363-377.

DOUSSE, O. **Revising buffering in multihop CSMA/CA wireless networks**, Sensor, Mesh and Ad Hoc Communication and Networks SECON’07, 580-589 p. San Diego, CA. 2007.

DRAVES, R. PADHYE J. ZILL, B. **Comparison of Routing Metrics for Static Multihop Wireless Networks**, SIGCOM, 133-144 p. 2004.

DUREN, J.K. J.V. ROBINSON, M. R. LEIDHOLM, C. **High-throughput printing of chalcogen layer**, Patent Application Publication, Publication number: US 2007/0166453 A1, Assignees: Nanosolar, Palo Alto, CA, 2007.

DURYEA, S. ISLAM, S. LAWRENCE, W. **A Battery Management System for Stand Alone Photovoltaic Energy Systems**, Industry Applications Conference IEEE, 4 v. 2649-2654 p. 1999.

ENERSYS, **Manual Application: Genesis NP and NPX Series**. Pensilvânia: EnerSys. 2006. 16 p.

ERIC, P. ROSS, M.M.D. **Recommended Practices for Charge Controller**. Renewable Energy and Hybrid Systems Group. 68 p. aug. 1998

FACCIN, S.M. WIJTING, C. KNECKT, J. DAMLE, A. **Mesh WLAN Networks: Concepts and System Design**, Wireless Communication IEEE, 13 v. 10-17 p. 2006.

FARBOD, A e TODD, T. D. **Resource Allocation and Outage Control for Solar Powered ESS Mesh Networks**, IEEE Transactions on Mobile Computing, v. 6, n. 8, p. 960-970, aug 2007.

FILHO, J. C. M. **Mecanismos de controle de QoS - Qualidade de Serviço em redes IEE 802.11**, Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro – 2003.

FINKENZELLER, K. **RFID HANDBOOK: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification**, Wiley, 2nd Edition, 2003.

GLARE, P. G. W. **OXFORD LATIN DICTIONARY**, Oxford University Press, 1983.

GOLDEMBERG, J. VILLANUEVA, L. D. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**, São Paulo, EDUSP, 2003.

GREEN, M.A. **High Efficiency Silicon Solar Cells**, Optoelectronic and Microelectronic Materials And Devices Proceedings conference, 1-7 p. 1996.

GREENLEE, D. **Europe's Largest Wi-fi Hostpot**, Disponível em <<http://www.webtalkguys.com/article-largesthotspot.shtml>>. Acesso em 8 de julho de 2007.

GREENPRO, **Energia Fotovoltaica: Manual sobre Tecnologias, Projeto e Instalação**. 2004. 368 p.

GREEN-WIFI Organization. **Solar Wi-fi Grid Project**. Protótipo disponível em: <<http://www.green-wifi.org/projects/gw/Green-WiFi-1-Pager.pdf>>. Acesso em 14 de março de 2007.

HARRINGTON, S. DULOP, J. **Battery charge controller characteristics in photovoltaic systems**. v. 7, n. 8, p. 15-21 aug. 1992.

HERRERO, A. R. MELO, C. ZUFFO, M.K. LOPES, R.D . **Sistema Autônomo de Comunicação Sem Fio em Malha Alimentado por Energia Solar Fotovoltaica**. In: II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES, 2008, Florianópolis. CBENS ISES-CLA, 2008.

HOWARDS, T. WIGGINS, R. **Wi-Fi Mesh Will Continue to Grow with the Evolution of Wireless Broadband Access**, YANKEE GROUP, 26 de Janeiro de 2007.

IBGE, dados do **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística** de 2005[Online] Disponível no site <www.ibge.gov.br>.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 2006: History Of Wireless Communication**. Disponível em: <<http://www.wirelesshistory.org>>. Acesso em 10 de agosto de 2007.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**, 1999.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11a: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band**, 1999.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11b: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band**, 1999.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11g: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band**, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11s: Extended Service Set Mesh Networking working group**, 2004.

ITU-D: **Information and Communication Technology Statistics**, ITU, 2008.

JOHANSSON, P. KAZANTZIDIS, M. KAPOOR, R. GERLA, M. **Bluetooth: an enabler for personal area networking**, Network, IEEE, 15 v. 28-37 p. 2001.

KAHN, J.M. BARRY, J.R. **Wireless infrared communications**, Proceedings of the IEEE, 85 v. 265-298 p. 1997.

KRAVETS, R. CARTER, C. MAGALHÃES, L. **A cooperative approach to user mobility**, ACM SIGCOM, 31 v. 57-69 p. 2001.

KUO, F.F. **The ALOHA System**, ACM SIGCOMM, 4 v. 1 n. 1974.

LEE, Y.J. RILEY, G.F. **A workload-based adaptive load-balancing technique for mobile ad hoc networks**, Wireless Communications and Networking Conference, IEEE, 4 v. 2002-2007 p. 2005.

LINDEN, D. REDDY. B. T. **Handbook Of Batteries 3rd Edition**. McGraw-Hill, New York, ISBN 0-07-135978-8, 22 c. 2002.

MAGOLIS, M. **The Humblest Digital City**, Newsweek International, Atlantic Edition, June 7, 2004.

MERAKI Company. **Meraki Solar**. Disponível em <<http://meraki.com/press-releases/2007/06/03/meraki-introduces-first-solar-powered-outdoor-wi-fi-access-kit/>>. Acesso em 5 de junho de 2007.

MILLER, V. **Wiring the valley for wi fi is heating up: Feasibility study is initial step toward Internet access for all**. Disponível em <<http://www.lvbusinesspress.com/articles/2006/04/04/news/news05.txt>>. Acesso em 8 de agosto de 2007.

MILLS, A.A. CLIFT, R. **Reflections of the Burning mirrors of Archimedes**, European Journal of Physics, 1992.

MIRANDA, L.C. HORNUNG, H. H. ROMANI, R. BARANAUSKAS M.C.C. LIESENBERG, H. K.E. **Entendendo a Idéia do Projeto UCA ao Desenvolvimento Comunitário: Reflexão e Estratégias**, Anais do XXVIII Congresso SBC, 107-116 p. 2008.

MIYAMOTO, S. MORINAGA, N. **Effect of microwave oven interference on the performance of digital radio communication systems**, IEEE International Conference, 1 v. 51-55 p. 1997.

MOEHLECKE, A. ZANESCO, I. **A tecnologia de silício é líder no mercado mundial**. Caderno Técnico, Metalurgia & Materiais, Mercado, Física e Processamento de Células Solares 61 v. 394 – 397 p. 2005.

MONTEIRO, L.G. ZILLES, R. **Estratégias de Controle de Carga em Pequenos Sistemas Fotovoltaicos**. São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia – Universidade de São Paulo. 9 p. 2004.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, **NASA: Solar System Exploration**, Disponível em: <<http://solarsystem.nasa.gov/planets/>>, Acesso dia 1 de janeiro de 2008.

OHMORI, S. YAMAO, Y. NAKAJIMA, N. **The future generations of mobile communications based on broadband access technologies**. Communication Magazine, IEEE, 38 v. 134-142 p. 2000.

PASSOS, D. TEIXEIRA, D. MUCHALUAT-SAADE, D. MAGALHÃES L.C.S. ALBUQUERQUE, C. **Mesh Network Performance Measurements**. Trabalho que contou com apoio da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa brasileira, 2006.

PEREIRA, E. B. MARTINS, F. R. ABREU, S.L. RUTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar – Banco de dados terrestre**. Editora Universitária da UFPE 2006.

RAMACHANDRAN, K. BELDING-ROYER, E.M. ALMEROTH, K.C. **DAMON: A Distributed Architecture for Monitoring Multihop Mobile Networks**. IEEE SECON, 1 v. 601-609 p. 2004.

ROCH, S. 2005. **Nortel's Wireless Mesh Network solution: Pushing the boundaries of traditional WLAN technology**, Nortel Technical Journal, 2 v. 18-26 p.

SEDOYEKA, E. HUNAITI, Z. AL NABLAN, M. BALACHANDRAN, W. **WiMAX Mesh networks for underserved areas**, Computer Systems and Applications, AICCSA, IEEE/ACS International Conference, 1070-1075 p. 2008.

SOLAR SYSTEM, **Victorian Project**. Disponível em <<http://www.solarsystems.com.au/154MWVictorianProject.html>>. Acesso em 11 de agosto de 2008.

STANDAGE, T. **The Victorian Internet**, Berkley Trade, 1999.

TANEMBAU, A.S. **Computer Networks**. 4th Ed, Amsterdam, Holanda, Prentice Hall, 2002.

THUILLIER, P. **De Arquimedes a Einstein: A face oculta da invenção científica**, Jorge Zahar, 1994.

TSARMPOPOULOS, N. KALAVROS, I. LALIS, S. **A Low-cost and Simple-to-Deploy Peer-to-Peer Wireless Network based on Open Source Linux Routers**, TRIDENTCOM 2005, IEEE Press, 92-97 p. 2005.

WEBER, S. CAHILL, V. CLARKE S. e HAAHR, M. **Wireless Ad Hoc Network for Dublin: A Large-Scale Ad Hoc Network Teste-Bed**, ERCIM News 54 v. 2003.

WICHERT, B. **PV-Diesel Hybrid Energy system for Remote Area Power Generation-A Review of Currrent Practice and Future Developments**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1 v. 3 n. 209-228 p. 1997.

WIJESINHA, A. L. SONG, Y. KRISHNAM, M. MATHUR, V. AHN, J. e SHYAMASUNDAR, V. **Throughput Measurement for UDP Traffic in a IEEE 802.11g WLAN**, Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, 2005 and First ACIS International Workshop on Self-Assembling Wireless Networks. SNPD/SAWN 2005. Sixth International Conference on, 220-225 p. 2005.

WIMAX FORUM, Site contendo diversas informações sobre o padrão 802.16. Disponível em <<http://www.wimaxforum.org/home/>>. Acesso em 20 de Janeiro de 2006.

XIAO, Q. ZHOU, X. **The study of multiwalled carbon nanotube deposited with conducting polymer for supercapacitor**, Electrochimica Acta, 48 v. 575-580 p. 2003.

XIAO, Y. **IEEE 802.11N: Enhancement for Higher Throughput in Wireless LANs**, Wireless Communication, IEEE, 12 v. 82-91 p. 2005.

ZHANG, F. TODD, T.D. ZHAO, D. KEZYS, V. **Power saving access point for IEEE 802.11 wireless network infrastructure**, Wireless Communication and Networking Conference, WCNC. v. 1, n. 21-25, p. 192-200, mar 2004.

ZWEIBEL, K. MASON, J. FTHENAKIS, V. **A Solar Gran Plan**, Scientific American Magazine, 34-43 p. 2008.